

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN
(GIST)



Trabajo Fin de Grado

Análisis de las figuras de mérito en las pruebas FAT
para los equipos de una estación de control en un
sistema real de TTC para Galileo.

Autor: Francisco Javier Casado Horas

Tutor y cotutor:

Francisco Javier Escribano Aparicio

Pedro Luis López Ruiz

2020

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

**GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE
TELECOMUNICACIÓN (GIST)**

Trabajo Fin de Grado

Análisis de las figuras de mérito en las pruebas FAT para los equipos de una estación de control en un sistema real de TTC para Galileo.

Autor: Francisco Javier Casado Horas

Tutor: Francisco Javier Escribano Aparicio

Cotutor: Pedro Luis López Ruiz. **Empresa:** INDRA SISTEMAS S.A.

TRIBUNAL:

Presidente: José Luis Álvarez Pérez

Vocal 1º: David de la Mata Moya

Vocal 2º: Francisco Javier Escribano Aparicio

FECHA: 2020

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
PALABRAS CLAVE	3
SUMMARY	4
KEYWORDS.....	4
RESUMEN EXTENDIDO	5
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN SATELITALES	11
2.1. <i>HISTORIA</i>	11
2.2. <i>FUNCIONAMIENTO</i>	13
2.3. <i>CLASIFICACIÓN DE LOS SATÉLITES</i>	15
2.4. <i>BANDAS DE FRECUENCIA</i>	17
3. GNSS	19
3.1. <i>DEFINICIÓN</i>	19
3.2. <i>FUNCIONAMIENTO</i>	20
3.3. <i>APLICACIONES</i>	20
3.4. <i>DESPLIEGUES PRINCIPALES</i>	22
4. GALILEO	23
4.1. <i>DEFINICIÓN</i>	23
4.2. <i>FUNCIONAMIENTO</i>	24
4.3. <i>ELEMENTOS DEL SISTEMA GALILEO</i>	26
4.4. <i>BANDAS DE FRECUENCIA GALILEO</i>	28
5. COMUNICACIÓN ENTRE UNA ESTACIÓN DE CONTROL Y UN SATÉLITE.....	30
5.1. <i>EQUIPOS DE LA ESTACIÓN DE CONTROL</i>	31
5.2. <i>PRUEBAS FAT EN UN SISTEMA REAL GALILEO. RUIDO DE FASE</i>	34
5.3. <i>ANÁLISIS DE LA COMUNICACIÓN ENTRE UNA ESTACIÓN TERRENA DE CONTROL Y UN SIMULADOR DE SATÉLITE REAL DE LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA DE GALILEO</i>	41
5.4. <i>RESOLUCIÓN DE FALLOS</i>	46
6. CONCLUSIONES	48
7. BIBLIOGRAFÍA.....	50

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado se estructura en dos partes. En la primera, se realiza un desarrollo teórico acerca de los sistemas de comunicación vía satélite analizando cómo han evolucionado y sus características al detalle, centrándose posteriormente en la parte de comunicaciones del sistema Galileo. En la segunda, se desarrollan dos pruebas en un sistema real de Galileo: una consiste en medir un tipo de distorsión de la señal en la comunicación (ruido de fase) y la otra en analizar la comunicación de una estación de control con un simulador de satélites Galileo.

PALABRAS CLAVE

- Sistema de comunicación vía satélite
- Galileo
- Ruido de fase
- Estación de control
- Simulador satélites Galileo

SUMMARY

This Final Degree Project is divided into two parts. In the first, a theoretical development about satellite communication systems is carried out, analyzing how they have evolved and their characteristics in detail, later focusing on the communications in the Galileo system. In the second, two tests are carried out in a real Galileo system: one consists in measuring a type of signal interference in communication (phase noise) and the other in analyzing the communication of a control station with a simulator of Galileo satellites.

KEYWORDS

- Satellite communication system
- Galileo
- Phase Noise
- Control station
- Galileo satellite simulator

RESUMEN EXTENDIDO

Este Trabajo de Fin de Grado consta de dos partes principales: la primera se centra en un desarrollo teórico de los sistemas de comunicación con satélites y la segunda se divide en dos pruebas diferentes realizadas en un sistema de Galileo real dentro de la empresa INDRA Sistemas S.A., por lo que es la parte que más valor aporta al proyecto al haber realizado las pruebas dentro de la empresa, lo que ha permitido un conocimiento más amplio acerca de este tema al tener acceso a gran cantidad de documentos de carácter confidencial.

El trabajo comienza con una introducción donde se explica el ámbito sobre el que se va a trabajar y cómo se va a abordar. Continúa con una contextualización de los sistemas de comunicación satelitales, explicando cómo han evolucionado a lo largo del tiempo y exponiendo también el funcionamiento de este tipo de sistemas con sus características detalladas como, por ejemplo, las distintas bandas de frecuencia a las que pueden operar, y la clasificación de los diferentes tipos de satélites que hay en función de la distancia de la órbita a la que se encuentren (GEO, MEO, LEO y HEO).

Después, el trabajo se centra en los sistemas globales de navegación por satélite GNSS, detallando su particular funcionamiento y las aplicaciones para las que se da uso en la actualidad a este tipo de sistemas, distinguiendo entre las de ámbito militar, civil y científico. Se nombran los cuatro principales sistemas GNSS desarrollados por las principales potencias: GPS por Estados Unidos, GLONASS por Rusia, Beidou por China y Galileo por Europa. Sobre el sistema Galileo se profundiza en los apartados siguientes, al ser el sistema en el que se van a desarrollar las pruebas experimentales posteriormente.

Para conocer más sobre el sistema Galileo se desarrollan las particularidades de su funcionamiento. Después, se explican los elementos que forman una comunicación satelital de este tipo, que se dividen en tres segmentos: espacial, terrestre y usuario, explicando en este último los servicios que aporta el sistema Galileo al usuario. También se explica la banda de frecuencia utilizada para este sistema para cada uno de los servicios.

Para comenzar con la parte experimental del proyecto, se exponen los equipos ubicados en una estación de control real de Galileo, indicando la función que realiza cada uno de ellos y mostrando el camino que recorre la señal desde su origen en la estación hasta el satélite y viceversa en las comunicaciones de *command & control*. Tras esta introducción a una estación de control de Galileo, se detallan las dos pruebas que se

van a realizar en el trabajo mediante un sistema real de Galileo ubicado dentro de la empresa INDRA Sistemas S.A.

La primera prueba consiste en medir un tipo de distorsión de la señal en la comunicación denominado ruido de fase. Este se va a medir una vez que la señal haya recorrido todos los equipos que componen la cadena de transmisión dentro de la estación, por lo que se detalla cada elemento que interviene en esta prueba. La prueba se realiza con las dos posibles referencias que puede tener la estación, la referencia externa que es aquella que consta de una señal común a todos los equipos, por lo que están sincronizados, y la referencia interna, que es la propia de cada equipo de la estación. Se explican los pasos llevados a cabo y cómo mediante instrumentación de laboratorio se mide el ruido de fase en el punto deseado y se exponen todos los detalles que hay que tener en cuenta para poder realizar con éxito estas medidas. Se aporta gráficamente los resultados obtenidos para una de las ocho cadenas posibles de transmisión y se puede apreciar como este resultado de la prueba ha sido satisfactorio.

La segunda prueba consiste en analizar la comunicación de una estación de control real de Galileo con un simulador de satélites Galileo perteneciente a la ESA, que imita con gran fidelidad lo que ocurre en un satélite real del sistema Galileo. Para que esta comunicación sea posible y no ocurra cualquier tipo de error que la impida, se exponen todos los pasos que hay que tener en cuenta. En primer lugar, que las potencias y atenuaciones utilizadas en los distintos equipos sean las adecuadas, estando dentro del espectro de potencias que soportan, pues si no el equipo puede estropearse. También se explican los distintos tipos de conectores utilizados para los cables de la cadena de radiofrecuencia que constituyen todos los equipos de la estación, incluyendo esquemas de cómo están situados dentro de la estación. Una vez expuesta la configuración utilizada para todos estos equipos, se explican las directrices a seguir a través de una interfaz mostrada en un ordenador de la estación para que se establezca la comunicación entre la estación de control y el simulador de satélites Galileo de la ESA. Se muestran evidencias de que el resultado es satisfactorio, aunque están limitadas por la gran confidencialidad que INDRA Sistemas S.A. y la ESA guardan sobre las características de este sistema.

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ACU	<i>Antenna Control Unit</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CS	<i>Commercial Service</i>
DSSS	<i>Direct-Sequence Spread Spectrum</i>
DTR	<i>Digital Tracking Receiver</i>
ESA	Agencia Espacial Europea
FAT	<i>Factory Acceptance Test</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FOC	<i>Full Operational Capability</i>
GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
GLONASS	<i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HEO	<i>Highly Elliptical Orbit</i>
IF	<i>Intermediate Frequency</i>
INTELSAT	<i>International Telecommunications Satellite Organization</i>
IOV	<i>In-Orbit-Validation</i>
ISS	Estación Espacial Internacional
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LHCP	<i>Left-Hand Circular Polarized</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
MEO	<i>Medium Earth Orbit</i>
MMI	<i>Man-Machine Interface</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NAVSTAR	<i>Navigation System Timing and Ranging</i>
OS	<i>Open Service</i>
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Efectiva
PM	<i>Phase Modulation</i>
PRS	<i>Public Regulated Service</i>
RHCP	<i>Right-Hand Circular Polarized</i>
SoLS	<i>Safety of Life Service</i>

SSPA	<i>Solid State Power Amplifier</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TTC	<i>Telemetry & TeleCommand</i>
URSS	Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas

1. INTRODUCCIÓN

Este Trabajo Fin de Grado se plantea con el objetivo de realizar un análisis de las comunicaciones con satélite, en particular de las comunicaciones *command & control*, y dentro de ellas se profundiza en el sistema Galileo. Además, se exponen varias pruebas que he realizado en un sistema real en Indra Sistemas S.A., por lo que la exposición tiene un gran valor experimental, para favorecer la comprensión del funcionamiento de este tipo de comunicaciones.

Para abordar este objetivo se comienza realizando un estudio de la evolución que ha habido de la comunicación vía satélite desde sus inicios y las principales características de esta, así como las aplicaciones para las que se utiliza en la sociedad este tipo de comunicación.

Posteriormente, se explican los principales elementos que componen los sistemas de comunicación vía satélite que existen en la actualidad. Se profundiza en el sistema Galileo, del que se explica su particular funcionamiento, los elementos que intervienen en una comunicación de este tipo y cómo se lleva a cabo.

Finalmente, se ha realizado una descripción experimental de dos pruebas realizadas en un sistema real de Galileo. Dichas pruebas tienen gran valor didáctico, pues muestran aspectos de cómo funciona un sistema real de Galileo. Hay una limitación importante en temas de confidencialidad que se debe a que se exponen aspectos que corresponden al sistema Galileo que se utiliza en la actualidad, pero dicha confidencialidad no impide la comprensión sobre el tema que se trata.

La primera prueba se encuadra dentro de las pruebas *Factory Acceptance Test* (FAT), que son aquellas que deben superar los equipos para comprobar que su funcionamiento es correcto para instalarse en una estación de control. En ella se mide el ruido de fase en la cadena de transmisión de la estación de control, que es un tipo de interferencia en la señal potencialmente dañino. Su resultado es de gran valor porque muestra, en un sistema actual real de Galileo, cómo se observa la cantidad de interferencia de este tipo que tiene la señal después de haber pasado toda la cadena de transmisión y por qué es importante mantenerlo por debajo de ciertos valores para que no afecte a la señal transmitida. Estos valores deben ser menores que unos requisitos establecidos por la Agencia Espacial Europea (ESA) para que la comunicación con el satélite tenga una calidad lo suficientemente buena.

La segunda prueba consiste en realizar en un sistema real de Galileo una comunicación entre los equipos de una estación de control y un simulador de satélites Galileo de la

ESA, analizando con detalle cada elemento que se debe tener en cuenta para el establecimiento de la comunicación, cada paso que realiza la señal por los equipos de la estación de control y la función que realiza cada uno de ellos para que esta comunicación se lleve a cabo con resultado satisfactorio.

Por tanto, con este Trabajo de Fin de Grado se pretende mostrar a nivel académico cómo se establece la comunicación entre una estación terrena de control de *command & control* y un satélite de comunicaciones en el sistema real de Galileo y se expone cómo se realizan determinadas pruebas en los equipos de comunicación satelital reales, con el fin de verificar su idoneidad.

2. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN SATELITALES

Un satélite se podría definir como un objeto que gravita en una órbita cerrada alrededor de un planeta o de un cuerpo de masa preponderante; pueden ser naturales o artificiales [1], siendo estos últimos definidos según la Real Academia Española de la Lengua como “*Vehículo espacial, tripulado o no, que se coloca en órbita alrededor de la Tierra o de otro astro, y que lleva aparatos apropiados para recoger información y trasmitirla*” [2].

Los satélites artificiales son enviados al espacio mediante vehículos lanzadera o de lanzamiento, que constituyen un tipo de cohete. Estos satélites se fabrican por el ser humano para cumplir diferentes fines, algunos tienen la función principal de la comunicación y otros la utilizan, pero su función primordial es otra, como en el caso de los satélites de exploración astronómica [1].

2.1. HISTORIA

La primera referencia que se realiza de los satélites artificiales es en 1945 cuando un escritor británico, Arthur C. Clarke, hizo referencia a un sistema de comunicación global usando estaciones espaciales construidas por el ser humano [1].

Fue a partir de la Guerra Fría cuando el uso de los satélites artificiales se vio impulsado debido a la carrera espacial que se produjo entre Estados Unidos y la Unión Soviética [1]. Los primeros satélites eran pasivos, es decir, no transmitían señales de radio activamente, sino que su función era reflejar las señales que se emitían en las estaciones terrestres en todas las direcciones para que se pudieran captar en cualquier lugar del mundo [3].

El primer satélite artificial fue lanzado en 1957 por la URSS (Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas) y recibió el nombre de Sputnik I, y a partir de este hito se dieron los sucesivos lanzamientos de satélites al espacio [1].

La evolución de las comunicaciones vía satélite pasó a la utilización de sistemas activos, que son los que se utilizan en la actualidad, en los que cada satélite artificial llevaba su propio equipo de recepción y emisión. El primer satélite activo, el Score, lo consiguió poner en órbita Estados Unidos en 1958 [3].

La NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), creada por Estados Unidos, lanzó el primer satélite en órbita geosíncrona en 1963; este fue utilizado para la retransmisión de los juegos olímpicos de Tokio de 1964 [3].

En 1964 se formó con fines comerciales la *International Telecommunications Satellite Organization* (INTELSAT), que está constituida por más de 120 países y tiene su sede en Washington D.C. En la década de 1990 tenían ya 15 satélites en órbita; y en 2011 ya operaba una flota de 52 satélites de comunicación, lo que la convierte en la flota de satélites comerciales más grande del mundo [3].

Un gran avance en el uso de satélites artificiales fue el desarrollo por parte de los estadounidenses del primer sistema GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*): el sistema GPS (*Global Positioning System*), cuyo diseño conceptual sucedió en 1972 y el primer satélite lanzado fue en 1978. Paralelamente, la Unión Soviética desarrolló su propio sistema, llamado GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) y puso el primer satélite en órbita en 1982. Al principio estos sistemas tenían un uso exclusivamente militar, pero en la década de los años 80 se comenzaron a utilizar para uso civil, aunque, inicialmente se ejercía un control militar sobre este uso como el Departamento de Defensa de Estados Unidos en el sistema GPS. Esto llevó a que una potencia como la Unión Europea comenzara a desarrollar su propio sistema, NAVSTAR (*Navigation System Timing and Ranging*), que más tarde acabaría llamándose Galileo.

Desde 1984, con muy pocos satélites en órbita, aparecieron tímidamente fabricantes de receptores GPS destinados al mundo civil (*Texas Instruments* y *Trimble Navigation*), que al principio tenían un gran tamaño. El desarrollo del software inicial en materia de procesamiento de datos fue creciendo de manera exponencial y en 1988 se presentó el primer receptor GPS de mano. Durante la década de los años 90, nuevas tecnologías y algoritmos permitieron un espectacular aumento de prestaciones y nuevos servicios.

El fin de la Guerra Fría entre los Estados Unidos y la Unión Soviética hizo que se facilitara la cooperación entre ambas potencias, lo que hizo que avanzaran en calidad los sistemas GPS y GLONASS. En el año 2003 se aprobó el sistema Galileo por la Comisión Europea y en el 2004 se alcanzó un acuerdo de interoperabilidad entre Galileo y GPS. El desarrollo de los sistemas GNSS alternativos es uno de los principales impulsores de los planes de actualización de GPS por parte del gobierno de los Estados Unidos [4].

Por otra parte, el mayor satélite artificial construido es la Estación Espacial Internacional (ISS), una estación de investigación donde colaboran varios países, que orbita alrededor de la tierra a una altura de 360 km. La ISS se ha construido en el espacio en diferentes fases y tiene 108 metros de largo y 88 metros de ancho [1].

Desde el inicio, miles de satélites han sido enviados a diferentes órbitas del espacio con diferentes propósitos, situándose la gran mayoría alrededor de la Tierra, aunque también existen satélites operativos que orbitan alrededor del Sol y de otros planetas [1]. Actualmente hay en funcionamiento cientos de satélites activos de comunicaciones en el espacio [3].

2.2. FUNCIONAMIENTO

Un sistema de comunicación por satélite está formado principalmente por tres elementos: un satélite o un conjunto de satélites, que son el elemento principal ya que se encargan de establecer la comunicación entre el emisor y el receptor; el centro de control, que se encarga de vigilar el correcto funcionamiento de los satélites; y las estaciones terrestres, que actúan tanto de emisoras como de receptoras, y contienen las antenas y equipos necesarios para emitir y recibir señales [3]. En las siguientes figuras podemos ver los elementos que conforman los dos extremos de la comunicación para las comunicaciones de control. En la Fig.1 se observa un satélite de comunicaciones, que se caracterizan por tener dos antenas con las que se comunican. En la Fig.2 se muestra la estación terrena de control de Galileo situada en Noumea, la antena de estas estaciones se caracteriza por tener grandes dimensiones, aproximadamente de unos 13.5 metros de diámetro.



Fig. 1. Satélite de telecomunicaciones. Fuente: Hispasat.



Fig. 2. Estación de control terrena de Galileo. Fuente: INDRA.

Así, los satélites activos de comunicaciones reciben las señales de una estación terrestre, las amplifican y las retransmiten con una frecuencia distinta hacia otra estación o a un terminal receptor manejado por un usuario [3].

Las órdenes que se envían desde las estaciones de control a los satélites se llaman telecomandos y el conjunto de datos que se mandan desde los satélites a las estaciones recibe el nombre de telemetría. Una de las principales funciones que tienen estos datos se conoce como *ranging*, y consiste en que, a través de la cadena de radiofrecuencia que engloba a todos los equipos dedicados tanto a la transmisión como a la recepción de datos entre una estación terrena de control y un satélite, podemos calcular la posición en la que se encuentra el satélite con gran precisión. Al principio se utilizaba la técnica de acceso FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), que se caracteriza porque se divide el ancho de banda en varias subbandas y se produce el acceso al satélite de forma continua en una banda de frecuencia dada. Más adelante, se desarrolló la técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), en la que cada estación transmite continuamente y en la misma banda de frecuencia con una “firma” codificada diferente. En la actualidad, se utiliza TDMA (*Time Division Multiple Access*), que consiste en que a cada estación se le asigna un intervalo de tiempo en un mismo canal para transmitir y

el resto controlan estos intervalos y seleccionan los datos que van dirigidos a ellas. Esta técnica se utiliza tanto para telecomandos como para telemetría en sistemas como, por ejemplo, Galileo, sistema en el que se profundizará en próximos apartados.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS SATÉLITES

Las constelaciones de satélites se clasifican principalmente en función de la distancia a la que esté situada la órbita en la que se encuentra con respecto a la Tierra:

- Los satélites de órbita elíptica alta *Highly Elliptical Orbit* (HEO). Estos satélites siguen una órbita elíptica, lo que supone que alcanzan distancias mayores en el punto de órbita más alejada. Al detectar un gran ángulo de superficie terrestre, se suelen utilizar para cartografiar la superficie de la Tierra [3].
- Los satélites geoestacionarios *Geostationary Earth Orbit* (GEO). Reciben este nombre por tener una velocidad de rotación igual que la Tierra, es decir un periodo orbital de 24 horas, lo que hace que se encuentren ubicados en un mismo punto visto desde el globo terrestre. Están situados en una órbita circular a 35.788 kilómetros de altura [1], [3]–[5].
- Los satélites de órbita media *Medium Earth Orbit* (MEO), situados entre los 6.000 y los 11.000 kilómetros de altitud, aunque también hay satélites a una mayor distancia de unos 20.000 kilómetros. Principalmente, son utilizados por los sistemas de posicionamiento terrestre [1], [5].
- Los satélites de órbita baja *Low Earth Orbit* (LEO), que se encuentran a una altura de entre 500 y 1.500 kilómetros. Tienen una gran importancia para la ciencia, puesto que se dedican a la observación de fenómenos naturales como la monitorización del clima, la determinación del campo de gravedad del espacio y ayudan a prevenir riesgos naturales como los terremotos [1], [4], [5].

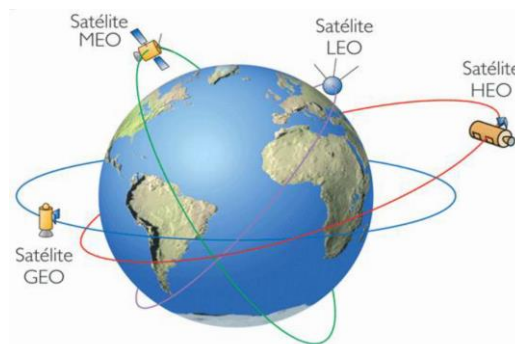


Fig. 3. Órbitas satelitales (LEO, MEO, HEO Y GEO) [3].

Las principales diferencias entre los satélites en función de sus órbitas se muestran en la Tabla 1. Como se puede ver en ella, las diferencias entre los satélites LEO, MEO, GEO y HEO no solo se ciñen a la distancia a la que se encuentran sus respectivas órbitas, sino que también varían en algunas de sus características, las más destacadas se exponen a continuación. Como ya se ha mencionado anteriormente, la principal característica que diferencia las órbitas HEO del resto, es su forma elíptica; este diseño conlleva cubrir un área mayor desde el apogeo, que es el punto de la órbita que se encuentra a mayor distancia de la Tierra, lo que permite dar cobertura a los polos terrestres. Para que los satélites LEO y MEO tengan una cobertura terrestre completa requieren de constelaciones de satélites, mientras que los GEO no llegan a dar cobertura en los polos y llegan hasta los 120° de longitud y 80° de latitud. Otra característica que los diferencia es el retardo con el que se comunican con la Tierra, que aumenta proporcionalmente a la distancia a la que se encuentren sus órbitas con respecto a la Tierra, así los LEO son los que tienen un menor retardo, mientras que los GEO y los HEO (en el apogeo) son los que más tienen. En cuanto al seguimiento que se realiza desde la Tierra sobre cada satélite en función de su tipo, para los LEO y MEO se utilizan antenas de baja ganancia, mientras que para los GEO son antenas fijas en un punto terrestre pues el satélite está ubicado en el mismo punto al ser geoestacionario y en el caso de los HEO se emplean antenas fijas para el sector más lento del apogeo. Por otro lado, en el caso de los LEO y MEO se usa una potencia de transmisión baja y en los GEO y HEO se emplean antenas de alta ganancia en el satélite. En cuanto al efecto Doppler que pueden sufrir, que es una variación de la frecuencia en la portadora deseada, los satélites situados a una órbita baja son los más afectados, por ello los LEO son los que mayor efecto Doppler tienen, mientras que en los MEO disminuye y en los GEO no es apreciable. El coste que conllevan el lanzamiento de estos satélites y su mantenimiento aumenta proporcionalmente a la distancia, teniendo las constelaciones de satélites LEO y MEO un coste medio y los GEO un coste muy alto. Finalmente, cabe destacar que los satélites MEO y LEO tienen mejor rendimiento que los GEO en sus comunicaciones con las estaciones terrenas debido a que la distancia respecto a la tierra es menor [1].

	LEO	MEO	GEO	HEO
Tipo de órbita	Circular	Circular	Circular, geosíncrona y ecuatorial	Elíptica. Perigeo de cientos de km, apogeo de miles de km
Área de cobertura	Total, con constelaciones	Total, con constelaciones	120° en longitud y 80° en latitud, pero no pueden cubrir los polos	Diseñados para cubrir un área bajo el apogeo
Retardo	Muy bajo	100-200 ms	250 ms	250 ms (en el apogeo)
Congestión	No	No	Sí	No
Seguimiento en tierra	Antenas de baja ganancia con patrones hemisféricos u omnidireccionales	Antenas de baja ganancia con patrones hemisféricos u omnidireccionales	Antena fija en Tierra: satélite fijo en un punto del espacio	Antenas fijas para el sector más lento del apogeo
Potencia y ganancia	Potencia de transmisión baja	Potencia de transmisión baja	Antena de alta ganancia en el satélite	Antena de alta ganancia en el satélite
Efecto doppler	Alto	Medio	No	Bajo
Coste lanzamiento	Medio (constelaciones)	Medio (constelaciones)	Muy alto	Alto
Daño por radiación	No pasan por cinturones de radiación	Sólo durante el lanzamiento	Sólo durante el lanzamiento	Paso breve en cada órbita

Tabla 1. Diferencias entre satélites LEO, MEO, GEO y HEO [1].

2.4. BANDAS DE FRECUENCIA

Las antenas ubicadas en los satélites y en las estaciones terrenas funcionan a distintas frecuencias, que difieren entre satélites y también entre los enlaces ascendentes y descendentes en un mismo satélite [1]. Existen varias bandas de frecuencia, cada una de ellas contiene una cantidad de canales con un determinado ancho de banda en función del servicio que ofrecen [3]. Podemos apreciar la variedad de frecuencias que existen en la Tabla 2.

Banda de frecuencias	f (GHz)
L	1-2
S	2-4
C	4-8
X	8-12,4
Ku	12,4-18
Ka	18-26,5

Tabla 2. Bandas de frecuencia [6].

- **Banda L:** Las antenas que se utilizan para esta banda de frecuencias son monopolos pequeños que no necesitan estar apuntando al satélite, como por ejemplo las utilizadas en teléfonos móviles y en coches. Al tener muchos usuarios y servicios está muy limitado el espectro disponible.
- **Banda S:** Es utilizada por radares meteorológicos y satélites de comunicaciones. Al ser frecuencias más altas que la banda L tiene mayores pérdidas atmosféricas, pero tiene la ventaja de tener un bajo nivel de ruido.
- **Banda C:** Su gran ventaja es que proporciona una buena relación entre ancho de banda y sus características de propagación. Además, los servicios tienen gran calidad debido a las bajas pérdidas por lluvia, aunque su principal inconveniente es que para la comunicación en esta banda de frecuencias se debe usar en la estación terrena una antena de muy grandes dimensiones, por lo que puede resultar muy costoso.
- **Banda X:** Se utiliza principalmente para servicios militares y tiene una mayor calidad de servicio que la banda C, puesto que se aprovechan las características de las estaciones militares de control que contienen equipos de gran coste y ofrecen mejor calidad.
- **Banda Ku:** Los principales servicios para los que se utiliza son las comunicaciones telefónicas y la transmisión de datos. Al tener un gran ancho espectral la regulación es más permisiva y se aprovecha para darle uso para este tipo de servicios, aunque tiene el inconveniente de tener más pérdidas en caso de lluvia.
- **Banda Ka:** Tiene pérdidas en caso de lluvia todavía más grandes que la banda Ku, por lo que su explotación supone un reto al tener que transmitir a una potencia muy elevada y aumentar la sensibilidad del receptor para tener una calidad aceptable en el servicio deseado [6].

3. GNSS

3.1. DEFINICIÓN

GNSS es el nombre genérico con el que se denomina a un tipo concreto de sistemas de navegación por satélite y sistemas de aumentación, que son capaces de calcular una localización con gran precisión gracias a las constelaciones de satélites y sus estaciones terrenas de control situadas en distintas partes del mundo. Los sistemas de aumentación corrigen las señales que los sistemas GNSS transmiten al receptor correspondiente del usuario, mejorando el posicionamiento horizontal y vertical del receptor, lo que permite una precisión inferior a dos metros a la vez que dan información sobre la calidad de las señales.

La definición de un sistema GNSS se basa en cuatro aspectos [4]:

- Global: Debe tener cobertura en todo el mundo. Estrictamente no es siempre cierto, pues hay localizaciones en las que se reduce la disponibilidad de señal debido a la geometría de la constelación.
- Navigation: Es el proceso de trasladar información de una localización a otra. No solamente proporcionan la ubicación sino también datos referidos a la navegación.
- Satellite: El uso de satélites en el espacio como puntos de referencia para la obtención de información es el concepto clave alrededor del que gira GNSS.
- System: Es un sistema complejo que está compuesto por satélites y está monitorizado y controlado desde las estaciones de control situadas en distintas zonas del planeta.

Los sistemas GNSS se comenzaron a desarrollar debido a un incidente de gran importancia que ocurrió durante el transcurso de la Guerra Fría en el año 1983, cuando un Boeing de Korean Airlines invadió el espacio aéreo ruso por un error de geolocalización y fue derribado por dos cazas soviéticos [5]. Desde entonces, estos sistemas se han ido desarrollando y siguen haciéndolo en la actualidad, conllevando esto una gran mejora en materia de localización, al conseguir una calidad de precisión en la ubicación de unos centímetros aproximadamente, lo que mejora los errores de sistemas anteriores, que eran de varios metros. La previsión para los próximos años es que la demanda de este servicio crezca en gran medida con la generalización de su uso en automóviles y su integración en los dispositivos móviles de última generación [4].

3.2. FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de los sistemas GNSS se basa en el concepto de diferencia de tiempo de llegada (*time-difference-of-arrival*) que utiliza una posición satelital precisa a través de unos relojes atómicos situados a bordo para generar mensajes de navegación que se transmiten continuamente desde cada uno de los satélites de la constelación GNSS. Estos mensajes pueden ser recibidos y procesados por usuarios en cualquier lugar del mundo que reciba cobertura del sistema. El receptor determina la distancia entre la estación terrena y el satélite midiendo el tiempo de viaje de la señal, y se necesita la información de tres satélites para determinar su precisión con un error de unos pocos centímetros; lo que mejora hasta unos nanómetros con la señal de un cuarto satélite, algo realmente impresionante comparado con tecnologías utilizadas con anterioridad a estos sistemas [4].

La frecuencia a la que trabajan estos sistemas varía, pues GPS al principio usaba frecuencias situadas en la banda L en torno a 1 GHz, mientras que Galileo utiliza frecuencias que pertenecen a la banda S, que comprende frecuencias desde los 2 GHz a los 4 GHz. Para los mensajes de navegación, en caso de que el enlace tenga una relación señal-ruido pequeña, para conseguir un BER (*Bit Error Rate*) lo menor posible se utiliza una velocidad baja de transmisión de datos [6], [7]. Para protegerse de posibles amenazas que puedan poner en peligro la disponibilidad del servicio, los GNSS actuales utilizan la técnica de acceso mediante espectro ensanchado [7].

3.3. APLICACIONES

Los campos de aplicación de los sistemas GNSS pertenecen a áreas muy variadas: usos civiles, militares y científicos como el transporte, la geología, la banca, etc. A continuación, se profundiza más en cada uno de los usos.

Dentro de las aplicaciones militares en las que supone una gran ventaja su utilización destaca:

- Operaciones aéreas para plataformas tripuladas o sin tripulación, en las que permite la navegación aérea punto a punto sin la ayuda de navegación terrestre.
- Operaciones navales, permitiendo una localización perfecta en la navegación marítima en mar abierto, puertos y tierra.

- Operaciones terrestres, en las que permite una mayor seguridad y llevar a cabo operaciones más eficientes al aumentar la calidad en el posicionamiento.
- Operaciones espaciales, en las que se consigue una ubicación precisa de la astronave militar de manera continua.
- Entrega precisa de armas en zonas de conflicto.
- Comunicaciones, en las que aporta una información de ubicación con una calidad muy alta y permite la transmisión de datos encriptados con una sincronización de frecuencia y tiempo.

Las aplicaciones civiles se ubican dentro de varios ámbitos, no sólo se utilizan en la navegación aérea y las operaciones de rescate, sino que también aportan información de calidad en la ciencia, la distribución de electricidad y en varias aplicaciones de ocio. Suponen una ventaja tanto para la gran industria como para el usuario común, puesto que los receptores están distribuidos en automóviles, barcos, teléfonos móviles, etc. Con el paso del tiempo el número de aplicaciones ha ido creciendo cada vez más con el objetivo de aumentar la calidad del servicio para una mayor cantidad de ámbitos de comercialización.

Estos sistemas han supuesto un gran avance dentro de la ciencia, para la cual se utiliza en distintas aplicaciones:

- **Clima:** Las señales multifrecuencia de los satélites GNSS están afectadas por las condiciones atmosféricas. Los diferentes efectos en estas señales se utilizan para extraer información útil de la troposfera y la ionosfera para mejorar los modelos atmosféricos y meteorológicos.
- **Uso global de sistemas de tiempo geo-referenciados** que emplean la información facilitada por los sistemas GNSS para mejorar el comportamiento de sus modelos.
- **Estudios ambientales** como, por ejemplo, la observación de mareas para lo que se utiliza un despliegue de boyas con receptores GNSS, o el seguimiento de los movimientos de animales como la obtención de rutas de migración de bandadas de pájaros, que nos ayudan a entender los patrones que siguen.
- **Sistemas de alerta sísmica basados en satélite**, en los que los geólogos utilizan receptores GNSS con los que determinar con precisión el movimiento de las placas tectónicas, efectos de la marea y fenómenos locales.

- Estaciones terrenas como radiotelescopios o sistemas de seguimiento de tierra por satélite, que requieren una alta precisión en los receptores GNSS utilizados para ayudar a determinar las condiciones locales y atmosféricas y mejorar sus modelos de comportamiento.

3.4. DESPLIEGUES PRINCIPALES

GNSS engloba en la actualidad cuatro sistemas de navegación diferentes, algunos de ellos ya mencionados en apartados anteriores, desarrollados por las principales potencias mundiales en el sector: GPS (EE. UU.), GLONASS (Rusia), Galileo (Europa) y BeiDou (China). Los primeros en desarrollarse fueron GPS y GLONASS, puesto que Estados Unidos y Rusia (antiguamente la Unión Soviética) eran las principales economías mundiales, y más tarde se incorporaron Galileo y BeiDou cuando crecieron Europa y Asia en potencial. Todos ellos se han ido actualizando y siguen haciéndolo hoy en día.

GPS actualmente es propiedad de la Fuerza Espacial de los Estados Unidos y el objetivo de este sistema es determinar la posición de un objeto de forma precisa. Para poder detectar o determinar esa posición, se usa un sistema de satélites que están en órbita en el espacio. Se necesitan al menos cuatro satélites para determinar esa posición. Se mide el tiempo que tarda en llegar la señal desde la ubicación del objeto al satélite y mide la distancia que hay entre ellos.

GLONASS fue desarrollado inicialmente por la antigua URSS y ahora es propiedad de la Federación Rusa. Cuenta con un total de 31 satélites en órbita, de los que 24 están operativos en la actualidad y puede ofrecer servicio a todo el mundo, aunque sea propiedad de Rusia.

BeiDou es la alternativa china a GPS, Galileo y GLONASS. Impulsada por el gobierno de China, cuenta ya con un total de 30 satélites en órbita, lo que les permite operar en todo el mundo.

Galileo es un proyecto de navegación de satélites desarrollado y financiado por la ESA y la Unión Europea y tiene como finalidad crear un sistema de posicionamiento de alta precisión. Galileo es un proyecto civil, de modo que a diferencia de GPS o GLONASS, que son impulsados con fines militares, no se busca hacer uso del mismo en el ámbito militar, ni se busca que un ejército tenga poder sobre el mismo, como pasa en el GPS [5], [8]. Este sistema se analizará más profundamente en el siguiente apartado.

4. GALILEO

Tras haber analizado en los apartados anteriores los sistemas de comunicación en general y más específicamente los sistemas GNSS, a partir de este apartado del trabajo se comenzará a tratar el objeto principal de la exposición, el sistema Galileo, que como ya se ha mencionado fue creado por la Unión Europea, y se encuadra dentro de los sistemas GNSS.

4.1. DEFINICIÓN

Galileo es el proyecto que se comenzó a desarrollar en Europa en el año 1999 con el objetivo de mejorar el sistema GPS estadounidense en la precisión de la ubicación deseada. Una gran diferencia de ese nuevo sistema con respecto a GPS y GLONASS es que su uso es de control civil, y una ventaja importante es que es compatible con otros sistemas GNSS. El proyecto se lleva a cabo por la ESA en colaboración con varias empresas de distintos países, uno de los cuales es España.

El principal motivo por el que la Unión Europea tomó la decisión de desarrollar un sistema propio (Galileo) es debido a que GPS y GLONASS tienen las siguientes características [5]:

- No cumplen todos los requisitos de navegación para la aviación civil en conceptos de precisión, fiabilidad e integridad.
- Están bajo control militar, lo que conlleva que en caso de haber una guerra no está asegurada su disponibilidad para el uso civil.
- No hay garantías legales ni de seguridad sobre su correcto funcionamiento, lo que puede dar lugar a que, en caso de un posible fallo del sistema que provoque un accidente, no haya responsabilidades legales.

Una de las características de mayor valor de Galileo es que utiliza el reloj más preciso que hay actualmente en el mundo. Se trata de un máser de hidrógeno que además de aportar un gran nivel de precisión, produce una señal sincronizada utilizada para obtener el posicionamiento más preciso del receptor GPS deseado, como puede ser un teléfono móvil o un vehículo [9].

4.2. FUNCIONAMIENTO

La comunicación de Galileo se caracteriza por varios parámetros y en función de ellos la misma se lleva a cabo de una manera u otra. Se puede realizar en modo coherente o no coherente y la modulación puede ser en espectro ensanchado por secuencia directa DSSS (*Direct-Sequence Spread Spectrum*) o en modulación analógica del tipo modulación en fase PM (*Phase Modulation*). El modo coherente significa que tanto el sistema de comunicación del satélite como los equipos de la estación están sincronizados a una misma referencia, por lo que la comunicación es mejor que si se configuran en modo no coherente, donde los equipos y el simulador del satélite usan cada uno su propia referencia, lo que provoca un mayor retardo y que el entendimiento entre ambas partes sea más complicado, aunque sus referencias internas sean precisas de por sí.

La modulación de espectro ensanchado se basa en una técnica de codificación que utiliza una señal de pseudoruido, que consiste en reducir el nivel de densidad espectral de potencia de la señal en cualquier frecuencia para asemejarla a los niveles de densidad espectral de potencia que tiene el ruido, por lo que solo es capaz de interpretarla el radiorreceptor al que va dirigida porque el resto no la diferencia del ruido. La modulación de fase se denomina así porque la fase de la señal portadora cambia en función de la señal moduladora. Esta modulación tiene el inconveniente de que necesita equipos de recepción más complejos y costosos además de que puede dar lugar a confusión en caso de que la fase de la señal sea 0° o 180° .

En la Tabla 3 y la Tabla 4 podemos apreciar las distintas posibilidades que hay para ambas modulaciones y las funciones que se cumplen para ellas.

SATÉLITE / ESTACIÓN CONTROL PARA MODULACIÓN PM	No coh. / No coh.	No coh. / Coh.	Coh. / No coh.	Coh. / Coh.
	Se recibe telemetría			
	Se envían telecomandos			
	No Ranging Medida			Sí Ranging Medida
	Sí Ranging Calibration			
	Hay Offset Oscilador		No hay Offset Oscilador	

Tabla 3. Modos satélite y estación de control para modulación PM. Fuente:

SATÉLITE / ESTACIÓN CONTROL PARA MODULACIÓN DSSS	No coh. / No coh.	No coh. / Coh.	Coh. / No coh.	Coh. / Coh.
	Se recibe telemetría	No se recibe telemetría		Se recibe telemetría
	Se envían telecomandos			
	No Ranging Medida			Sí Ranging Medida
	No Ranging Calibration	Sí Ranging Calibration	No Ranging Calibration	Sí Ranging Calibration
	Hay Offset Oscilador		No hay Offset Oscilador	

Tabla 4. Modos satélite y estación de control para modulación DSSS

Para la comprensión de la Tabla 3 y la Tabla 4, se exponen una serie de conceptos. En primer lugar, el oscilador es un equipo que se encuentra en el satélite y sirve para crear una señal con la frecuencia precisa a la que se opera. Un *offset* de frecuencia en el oscilador se produce cuando a la frecuencia de la portadora del satélite se le aplica una variación, por lo que la frecuencia cambia, lo que hace que la comunicación sea en el satélite en modo no coherente, por lo que el satélite y la estación utilizan cada uno su propia referencia.

Por otro lado, el “Ranging medida” es una función mediante la cual, teniendo en cuenta toda la cadena de transmisión y recepción entre la estación terrena de control y el satélite, se puede calcular con precisión la ubicación del mismo y el tiempo que tarda la señal en recorrer la cadena; y el “Ranging Calibration” es una función en la que se tiene en cuenta la cadena de transmisión y recepción, pero solamente en los equipos situados en la estación de control y se obtiene el tiempo que tarda la señal en hacer este recorrido. Estas dos funcionalidades sirven para calcular la distancia a la que se encuentra el satélite, ya que si restamos el tiempo obtenido en el “Ranging medida” con el tiempo calculado en el “Ranging Calibration” tenemos el tiempo que tarda la señal en recorrer desde la antena de la estación de control hasta el satélite. Con la ecuación $e = v * t$, siendo v la velocidad de la luz ($v = 3 * 10^8$ m/s) y t el tiempo calculado obtenemos la distancia que hay de la antena al satélite y obtenemos su posicionamiento con precisión.

En la Tabla 3 y la Tabla 4 se pueden apreciar las principales diferencias entre las dos modulaciones. En modulación PM siempre se recibe telemetría independientemente de con qué modo (coherente o no coherente) trabajen la estación y el satélite, mientras que en DSSS solamente se recibe telemetría cuando la estación y el satélite están a la vez en coherente o no coherente, pero no cuando uno de ellos está en coherente y el otro

en no coherente. Esto sucede porque en DSSS la estación y el satélite se comunican mediante códigos que pueden ser de dos tipos: código corto y código largo. Los códigos cortos se utilizan para el modo no coherente y los códigos largos para el modo coherente. Por lo tanto, si la estación está en modo no coherente espera recibir un código corto, que solo se recibirá si el satélite envía también un código corto porque está operando en modo no coherente. Si ambas partes están en modo coherente se recibe telemetría mediante códigos largos, pero si una está en coherente y la otra en no coherente no se va a poder recibir telemetría porque el satélite no envía el tipo de código que espera recibir la estación. La otra diferencia principal es que para la función “Ranging Calibration” en DSSS sólo se puede realizar esta medida en los casos en los que la estación opera en modo coherente, mientras que en PM se puede obtener en cualquiera de los casos.

Otro apunte es que en la recepción de la señal en la estación de control se puede polarizar a izquierdas LHCP (*Left-Hand Circular Polarized*) o a derechas RHCP (*Right-Hand Circular Polarized*). Se deberá usar la misma polarización en el transmisor y receptor para que la comunicación entre las antenas sea la adecuada.

4.3. ELEMENTOS DEL SISTEMA GALILEO

La infraestructura del sistema Galileo se divide en tres segmentos, según se puede ver en la Fig.4.

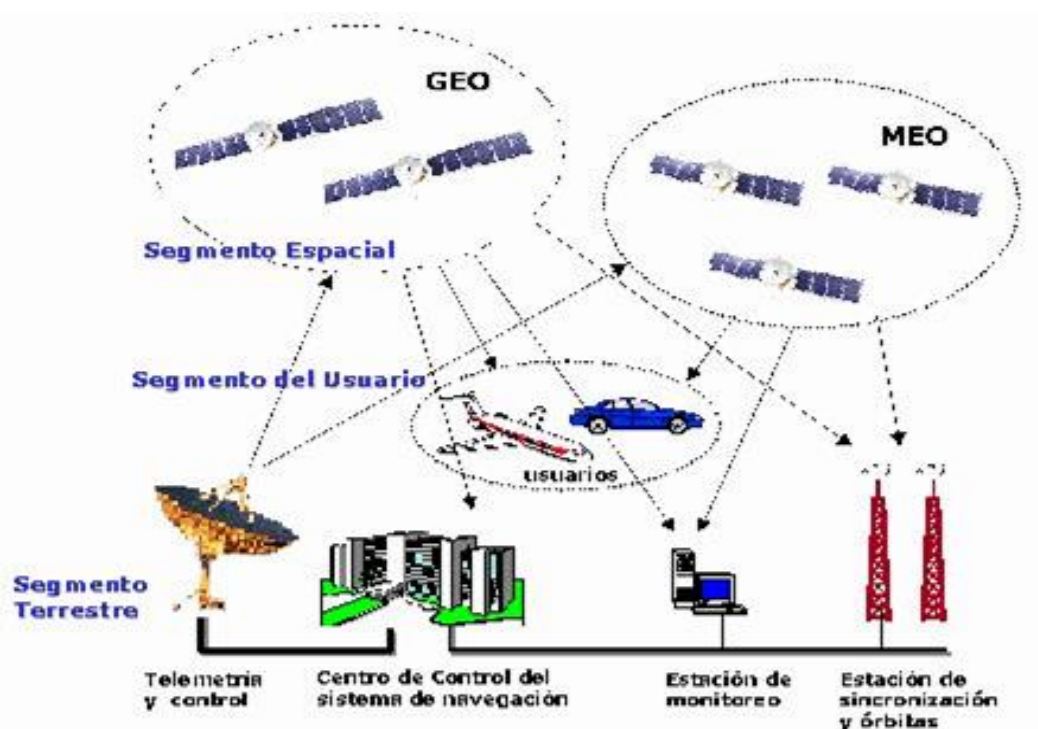


Fig. 4. Elementos del sistema Galileo [5].

Segmento espacial

Existen dos tipos de satélites Galileo: IOV (*In-Orbit-Validation*) y FOC (*Full Operational Capability*). Los primeros en desarrollarse fueron los IOV, que se comenzaron a lanzar en 2011 hasta llegar a tener una cantidad de cuatro situados en órbita. Más adelante, se desarrollaron los FOC para completar la infraestructura terrena y espacial de IOV con una tecnología más avanzada. En el lanzamiento de los primeros satélites de tipo FOC en 2014 surgió un problema, lo que obligó a retrasar el inicio del funcionamiento de Galileo con estos satélites hasta 2016. Actualmente, la constelación de satélites Galileo está formada por un total de 30 satélites, 27 de ellos están situados en una órbita MEO a una altitud de 23.222 km y tienen una inclinación de órbita de 56° , y los otros 3 satélites son GEO [8], [9].

Segmento de control

Las estaciones de control se denominan TTC (*Telemetry & TeleCommand*) porque se encargan de monitorizar la telemetría recibida de los satélites y de enviarles los telecomandos necesarios para comunicarse correctamente con ellos y mantener su estado de funcionamiento adecuado. En la actualidad hay varias estaciones de control distribuidas en distintas partes del mundo: Kiruna (Suecia), Kourou (Guayana Francesa), Isla Reunión (territorio francés), Noumea (Nueva Caledonia), Redu (Bélgica) y Papeete (Polinesia Francesa) [5], [9].

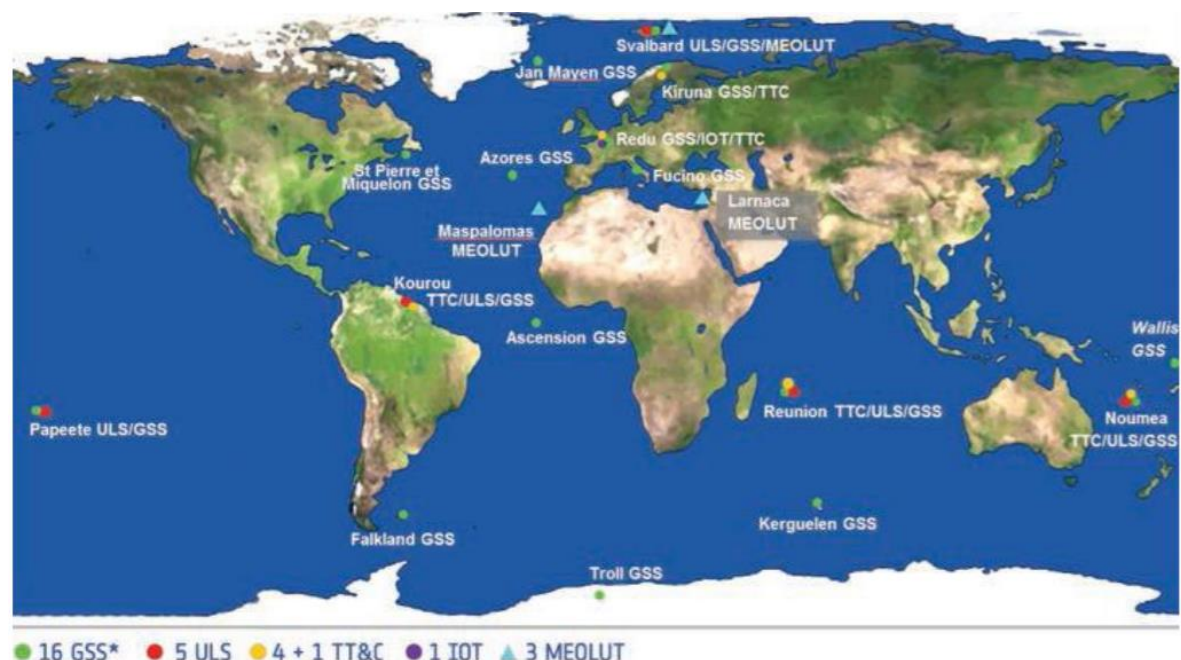


Fig. 5 Localización de las estaciones terrenas de control del sistema Galileo. Fuente: INDRA

En la Fig.5 se muestra un mapa de todas las estaciones Galileo, señalando con un círculo amarillo las estaciones terrenas de TTC, que son las nombradas anteriormente, a excepción de la estación de Papeete que al ser la última que se ha construido no aparece en el mapa.

Segmento usuario

Galileo tiene 4 principales servicios en función de la utilización para la que se requiera:

- Servicio abierto OS (*Open Service*). Es el servicio de Galileo gratuito accesible al usuario, que proporciona datos de posicionamiento y sincronización. En un futuro próximo, también proporcionará autenticación de mensajes de navegación, que permitirá mediante datos autenticados del mensaje de navegación calcular la posición del usuario.
- Servicio comercial CS (*Commercial Service*). Es una mejora del servicio abierto OS, ya que se añade la presencia de dos señales codificadas para proporcionar una señal de navegación adicional y servicios de valor agregado en una banda de frecuencia distinta.
- Servicio de salvamento SoLS (*Safety of Life Service*). Está dirigido a usuarios que necesiten una seguridad crítica, con una capacidad de precisión muy exacta y que disponga de sistemas de alarma. Este tipo de servicio se usa principalmente en la navegación civil y marítima y es el servicio europeo más avanzado de detección de alertas de socorro de búsqueda y salvamento por satélite.
- Servicio público regulado PRS (*Public Regulated Service*). Es un servicio especial restringido y sólo se puede utilizar por usuarios autorizados por el gobierno, para aplicaciones sensibles que requieren un alto nivel de continuidad del servicio [9] [10].

4.4. BANDAS DE FRECUENCIA GALILEO

En el sistema Galileo se utilizan diferentes bandas de frecuencia distribuidas en función del servicio al que vayan destinadas. En total, da uso a 10 radiofrecuencias: 4 frecuencias en el rango de 1164-1215 MHz (E5A-E5B), 3 frecuencias en el rango de 1215-1300 MHz (E6), 3 frecuencias en el rango de 1559-1610 MHz (L1).

- Banda E5: 1164 – 1215 MHz. Esta banda se divide en dos (Banda E5A y Banda E5B) con diferentes características de velocidades de bit y símbolo para los datos de navegación. Ambas se utilizan para servicio abierto OS y servicio de salvamento SoLS.

- Banda E6: 1215 – 1300 MHz. Se utiliza para servicio comercial CS y servicio público regulado PRS.
- Banda L1: 1559 – 1610 MHz. Se utiliza para servicio abierto OS, servicio de salvamento SoLS y servicio público regulado PRS.

Además, para los datos de *command & control*, existen nueve frecuencias distintas correspondientes a nueve canales definidos dentro de la banda S (entre 2 y 4 GHz), tanto para transmisión como para recepción entre las estaciones de control terrenas y los satélites [9].

5. COMUNICACIÓN ENTRE UNA ESTACIÓN DE CONTROL Y UN SATÉLITE

En el capítulo anterior se ha detallado en profundidad los aspectos específicos del sistema Galileo; por lo que ahora, en el capítulo presente, se centrará el desarrollo en la comunicación entre la estación de control y el satélite de un sistema Galileo.

Para explicar de manera precisa cómo se lleva a cabo la comunicación entre una estación de control y un satélite, se realiza un estudio en el que se abarca todos los aspectos de la comunicación y se refleja explicando el funcionamiento de las cadenas de radiofrecuencia, los equipos que intervienen en ellas y llevando a cabo dos pruebas en la empresa INDRA Sistemas S.A. En la primera, se analiza en una estación real de Galileo una interferencia importante al final de la cadena de transmisión que puede dar lugar a errores en la comunicación: el ruido de fase. En la segunda, se realiza en una estación real de Galileo la comunicación con un simulador de satélites Galileo perteneciente a la ESA. Son pruebas con un gran valor experimental, porque se muestra cómo se produce una comunicación de *command & control* en una estación real de Galileo con un simulador que asemeja mucho el comportamiento de un satélite, por lo que se trata de características y valores muy fieles a la realidad, de lo que hay escasa información publicada. Esto conlleva que no se pueden aportar todos los resultados y pruebas gráficas deseadas debido a la gran confidencialidad que tanto la ESA como INDRA Sistemas S.A. guardan sobre este tema; entre los datos que no se pueden mostrar se encuentran las frecuencias específicas a las que trabaja el sistema Galileo y ganancias y atenuaciones concretas utilizadas en los equipos de la estación de control. A pesar de esta confidencialidad, se ha podido profundizar lo suficiente en el tema para comprender cómo funciona un sistema Galileo en la realidad.

5.1. EQUIPOS DE LA ESTACIÓN DE CONTROL

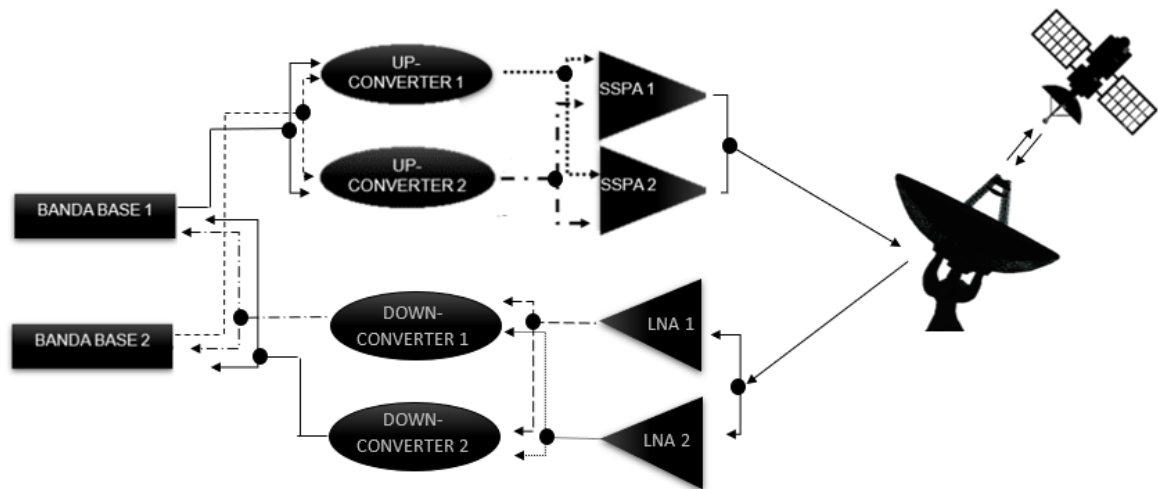


Fig. 6. Esquema de los equipos que intervienen en la comunicación entre una estación de control y un satélite. Fuente: Elaboración propia.

Para establecer la comunicación entre una estación terrena y un satélite se requieren una serie de equipos tanto en la estación como en el satélite. Situándose en la estación de control de referencia, la cadena de transmisión está formada por los siguientes equipos: un módem de banda base, un *up-converter* y un amplificador SSPA (*Solid State Power Amplifier*), teniendo redundancia de todos ellos por si falla algún equipo. La cadena de recepción está formada por un amplificador LNA (*Low Noise Amplifier*), un *down-converter* y un módem de banda base (el mismo que para transmisión), teniendo redundancia también. Todas estas cadenas se aprecian en la Fig.6, donde se representan también con círculos los *switches*, que son los elementos que seleccionan el camino que se desea tomar para enviar y recibir la señal en función de los equipos utilizados. A continuación, se exponen los equipos más relevantes de la cadena de radiofrecuencia ubicados dentro de la estación terrena.

Baseband Modem

Es el extremo de la comunicación desde donde se emite la señal hasta la antena en la cadena de transmisión y donde se recibe al final de la cadena de recepción. Tiene una amplia variedad de funcionalidades como la codificación y decodificación en banda base, la modulación y demodulación, la calibración simultánea y mediciones Doppler integradas [11]. En la Fig.7 se puede apreciar la vista frontal del módem de banda base, donde se visualizan mediante LED las funcionalidades que se están utilizando. En la Fig.8 se muestra la vista trasera del módem de banda base, donde se ven los distintos conectores que se utilizan.



Fig. 7. Vista frontal Baseband Modem. Celestia.



Fig. 8. Vista trasera Baseband Modem. Fuente: Celestia.

Convertidores

En la cadena de transmisión, la señal emitida por el módem de banda base se envía a los *up-converter* para desplazar la señal de IF (*Intermediate Frequency*) de varios MHz a una frecuencia de carácter confidencial situada en torno a los 2-3 GHz, con la que emitiremos desde la antena de la estación terrena hasta el satélite y viceversa porque es la más adecuada para el envío de los telecomandos y la telemetría. Este equipo introduce una ganancia que se ajusta en función de los requisitos deseados y tiene una referencia interna de gran precisión basada en una señal a 10 MHz.

En la cadena de recepción, para introducir la telemetría recibida en el módem de banda base, antes se debe pasar la señal por los *down-converter*, con los que se convierte la señal de una frecuencia perteneciente a la banda S a una frecuencia IF de varios MHz, que es con la que se trabaja en el módem de banda base tanto para el enlace ascendente como para el descendente [12]. En la Fig.9 se muestra la vista frontal del convertidor, en la que hay un panel donde se selecciona la frecuencia a operar, la ganancia introducida por el equipo y más características. En la Fig.10 se representa la vista trasera del convertidor, donde se aprecian los distintos conectores utilizados.



Fig. 9. Vista frontal convertidor [12].

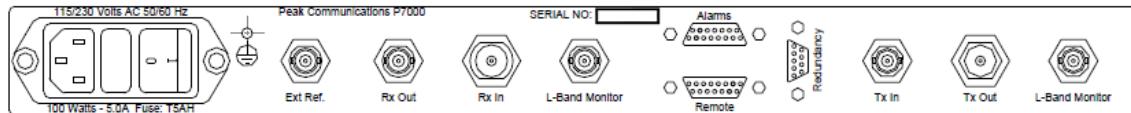


Fig. 10. Vista trasera convertidor [12].

Amplificadores

Tras los convertidores, la señal deberá introducirse en unos amplificadores de alta ganancia SSPA para ajustar el parámetro de la estación terrena PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva), que determina la potencia necesaria a transmitir para que la señal de la cadena de transmisión tenga suficiente calidad para ser procesada por el satélite.

En cuanto a la cadena de recepción, para que se cumpla el parámetro de la estación llamado sensibilidad y se pueda procesar, la señal que llega a la estación se amplifica sin aumentar el nivel de ruido y para ello se utilizan los LNA [13]. En la Fig.11 se puede apreciar la vista frontal de un SSPA, en cuya pantalla se muestra la potencia de salida que va dirigida hacia la antena entre otras funcionalidades.



Fig. 11. Vista frontal Solid State Power Amplifier. Fuente: China Ceyear.

ACU

El ACU (*Antenna Control Unit*) tiene la función de controlar la posición en la que se encuentra la antena de la estación de control respecto a los dos ejes de coordenadas (azimut y elevación), moviéndola dando instrucciones a un motor situado en la base de la antena para que haya un apuntamiento preciso con el satélite con el que se quiera comunicar y, por lo tanto, se lleve a cabo una comunicación óptima con el menor número

de pérdidas de apuntamiento posible [14]. En la Fig.12 se muestra la vista frontal del ACU, en cuya pantalla aparece la posición de la antenna en los distintos ejes y se puede apreciar cómo se puede mover con los distintos pulsadores.

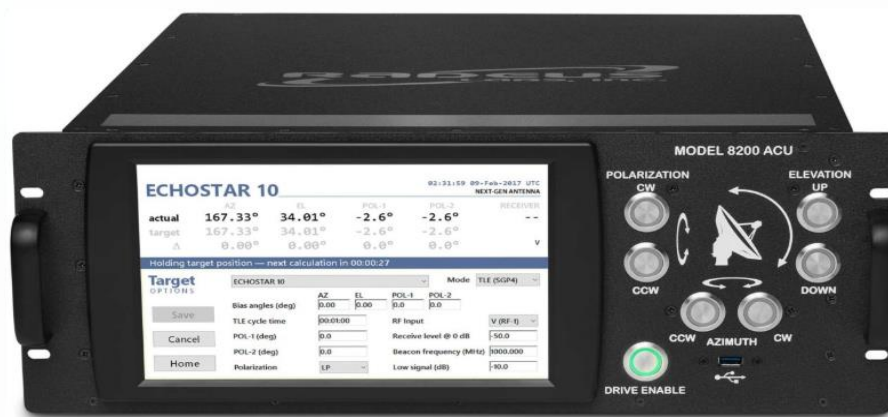


Fig. 12. Vista frontal ACU. Fuente: Radeus Labs.

DTR

En el DTR (*Digital Tracking Receiver*) se puede observar la señal que se recibe y la potencia a la que se encuentra en la frecuencia deseada para la comunicación. Demodula la señal situada a una frecuencia intermedia, extrae y corrige los errores en azimut y elevación y los transmite al ACU. Para ello, se analizan dos canales llamados Suma y Diferencia de la señal que recibe la estación terrena del satélite y, en función de cómo se comporten, es capaz de corregir las coordenadas en las que el ACU tiene programada la trayectoria de los satélites, mejorando la precisión de apuntamiento de la antenna al satélite. Es capaz de gestionar esta calibración mediante unos parámetros internos de carácter complejo [15]. En la Fig.13 se muestra la vista frontal del DTR, en la pantalla se puede observar la señal que se recibe y en los distintos botones configurar datos para poder apreciar la señal como la frecuencia y el ancho espectral que se desea ver.



Fig. 13. Vista frontal DTR. Fuente: Digisat.

5.2. PRUEBAS FAT EN UN SISTEMA REAL GALILEO. RUIDO DE FASE

Todos los equipos expuestos en el anterior apartado deben pasar unas pruebas para comprobar su correcto funcionamiento previo a la instalación de estos en su destino. Este conjunto de pruebas se llaman FAT y engloba todas aquellas que se realizan para

las situaciones posibles que se dan en la estación, tanto para la cadena de transmisión como la de recepción. A lo largo del recorrido de la señal por diferentes equipos aparecen una serie de interferencias con gran relevancia caracterizadas por las figuras de mérito y algunas de ellas son los espurios y el ruido de fase. La medición de todo este conjunto de interferencias se realiza en cada uno de los equipos que se utilizan en la estación para comprobar que todos realizan correctamente la función que les corresponde.

A continuación, se realizará un análisis de una prueba de ruido de fase a la salida de los amplificadores en la cadena de transmisión de una estación terrena de control de Galileo. Esta cadena de transmisión estará formada por consiguiente por un módem de banda base, un *up-converter* y un amplificador SSPA. Como se puede ver en la Fig.14, en la estación hay dos módems de banda base, dos *up-converter* y dos amplificadores, esta redundancia de los equipos es necesaria porque, si por algún motivo ocurre un fallo en un equipo, disponer de otro igual para que se pueda sustituir y no se tenga que detener el funcionamiento de la estación durante un tiempo prolongado. Por lo tanto, se tendrá un número de ocho posibles cadenas de radiofrecuencia y se debe realizar la prueba para todas ellas.

La configuración que tienen los equipos que intervienen se muestra en la Tabla 5, donde se pueden ver también las ocho posibles cadenas de transmisión en la estación de control de las que se tomarán medidas en esta prueba de ruido de fase.

Chain Transmission	Equipment Configuration
Transmission Chain Phase Noise. Configuration 1 BB- 1, U/C-1 and SSPA-1	<p>SSPA: Output power=50 dBW Attenuation internal=3 dB</p> <p>Up-converter: Gain = 20 dB</p>
Transmission Chain Phase Noise. Configuration 2 BB- 1, U/C-1 and SSPA-2	
Transmission Chain Phase Noise. Configuration 3 BB- 1, U/C-2 and SSPA-1	
Transmission Chain Phase Noise. Configuration: 4 BB- 1, U/C-2 and SSPA-2	
Transmission Chain Phase Noise. Configuration 5 BB- 2, U/C-1 and SSPA-1	
Transmission Chain Phase Noise. Configuration 6 BB- 2, U/C-1 and SSPA-2	
Transmission Chain Phase Noise. Configuration 7 BB- 2, U/C-2 and SSPA-1	
Transmission Chain Phase Noise. Configuration 8 BB- 2, U/C-2 and SSPA-2	

Tabla 5. Configuración de los equipos para la prueba de ruido de fase. Fuente:

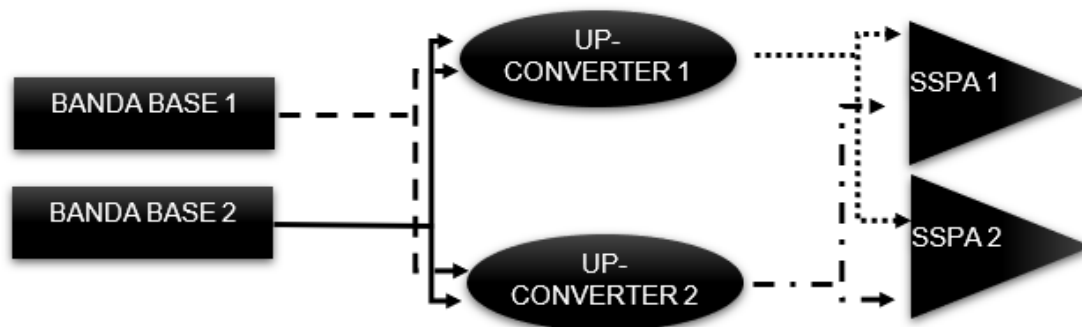


Fig. 14. Esquema de los equipos utilizados para la prueba de ruido de fase. Fuente: elaboración propia.

En todas las pruebas que se realizan con los equipos de la estación de control, es muy importante saber las atenuaciones y potencias que se van a dar a lo largo de la cadena de radiofrecuencia, pues se deben consultar los manuales de todos los equipos implicados para saber el margen de potencias que los caracterizan porque si se dan valores que están fuera de esos márgenes se puede llegar a producir la rotura del equipo.

Una vez que están los equipos que se van a utilizar en la prueba configurados, se procede a configurar la instrumentación de laboratorio que se va a utilizar. En este caso, se requiere un analizador de espectros para realizar las mediciones de la prueba.

El analizador de espectros del que se dispone tiene el menú de funciones para las mediciones que se puede apreciar en la Fig.15.



Fig. 15. Funciones analizador de espectros. Fuente: Elaboración propia

En referencia a la Fig 15, en “BW” (Bandwidth) se adapta el valor del ancho de banda a aquel que va a resultar de valor en la prueba y en “RES BW” la resolución a la que se van a mostrar los resultados de la prueba en la pantalla. En “SPAN” se configura las frecuencias inicial y final que se van a observar en el instrumento para la prueba, en este caso interesa que la frecuencia inicial sea 10 Hz y la final 10 MHz respecto a la señal portadora que se está midiendo.

En la misma figura, en la función “FREQ” se configuran todos los ajustes relacionados con la frecuencia y que se muestran en la Fig.16.

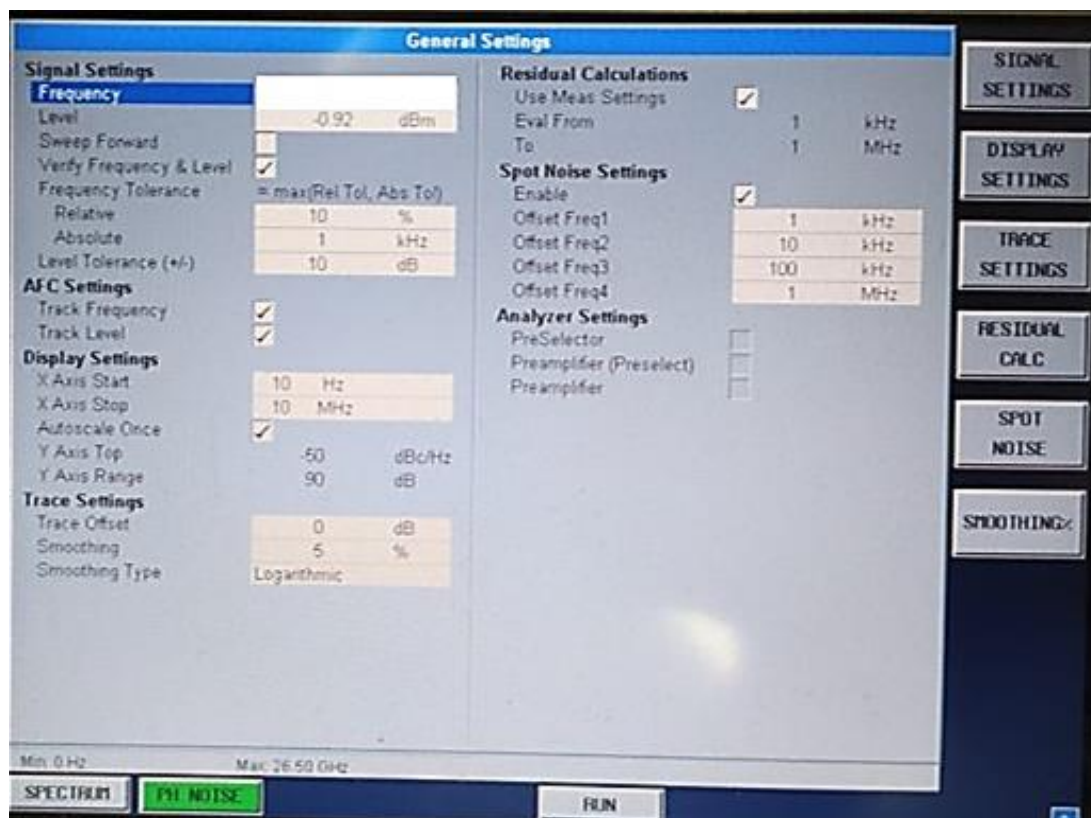


Fig. 16. Valores en el analizador de espectros para la prueba de ruido de fase. Fuente: Elaboración propia

Al abrir el menú de FREQ en “General Settings” se deben ajustar los distintos parámetros a los valores adecuados para la correcta realización de la prueba, como se puede ver en la Fig.16. En “Signal Settings” se selecciona la frecuencia central a la que se va a tomar la medida, que es la utilizada para telecomandos, situada en la banda S (2-3 GHz), y el nivel de potencia, que se debe cambiar a 0 dBm para que tome ese nivel de potencia como referencia. En “Display Settings” se seleccionan los extremos de los ejes de la representación. En el apartado “Trace Settings” se selecciona el tipo de *smoothing* y su valor. Este valor va a indicar el suavizado que se aplica a las respuestas de frecuencia colindantes a la que se está realizando las medidas. El suavizado consiste en que las respuestas de frecuencia colindantes situadas cerca de la portadora se

muestran con una proporción disminuida comparada a la portadora para poder apreciarla mejor. En “Spot Noise Settings” se seleccionan los valores de frecuencia para los que se desea obtener resultados en la prueba realizada, en este caso a 1KHz, 10 KHz, 100 KHz, aunque se añadirán marcadores en otros valores seleccionados dentro del SPAN: 10 Hz, 100 Hz y 10 MHz.

Después de realizar todos los ajustes anteriores para la prueba, se debe configurar la máscara, que es el valor límite que puede haber de ruido de fase para cada una de las frecuencias medidas. Estos valores son requisitos indispensables establecidos por la ESA que se deben cumplir para asegurar que la cadena de transmisión de la estación de control está funcionando correctamente. Dichos valores se muestran en la Tabla 6 y en la Fig.17 y se introducen en el analizador de espectros:

Frequency	Valor máscara (dBc/Hz)
10 Hz	-58
100 Hz	-68
1 KHz	-78
10 KHz	-88
100 KHz	-98
1 MHz	-108
10 MHz	-108

Tabla 6. Valores máscara para la prueba de ruido de fase. Fuente: Elaboración propia

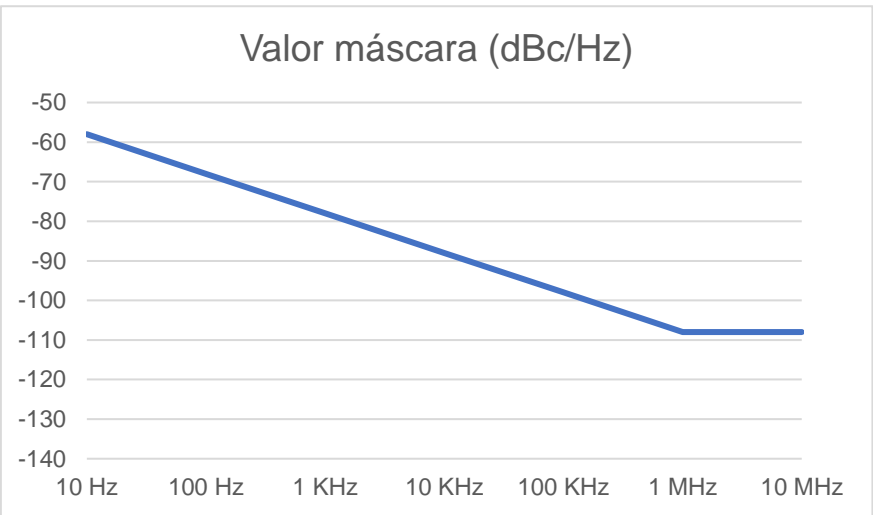


Fig. 17. Gráfica valores máscara para la prueba ruido de fase. Fuente: Elaboración propia.

Para que las medidas que realiza el analizador de espectros sean completamente fiables, se debe tener encendido antes de tomarlas media hora mínimo debido a que se deben ajustar todas las herramientas de calibración internas para poder realizar una medida con la máxima precisión posible.

Los convertidores deben estar conectados a la referencia externa que tienen todos los equipos de la estación de control, que es una señal a 10 MHz.

Tras haber configurado el analizador de espectros como se ha indicado anteriormente, se comienza a medir el ruido de fase de la portadora en los nueve canales establecidos dentro de la banda S para los telecomandos a las distintas frecuencias correspondientes, después de que la señal haya recorrido toda la cadena de transmisión de la estación de control. El canal 5 es el canal principal y está ubicado en la frecuencia central de los nueve canales que se están midiendo y para él se utiliza una modulación DSSS, mientras que en el resto de los canales se utiliza una modulación PM.

A continuación, en la Fig.18 y Fig.19, se exponen los resultados obtenidos en la prueba para una de las ocho cadenas de transmisión posibles (módem de banda base 1, *Up-converter* 1, SSPA 1) tomando como referencia en la Fig.18 la referencia externa de los equipos, en la que todos están sincronizados mediante una señal de 10 MHz, y en la Fig.19 tomando como referencia la referencia interna de los convertidores. Esta referencia interna está definida en los parámetros internos del convertidor y aunque tiene menor precisión que la referencia externa, al ser esta utilizada por todos los equipos de la estación, se mide para confirmar que en un caso en el que no se pueda utilizar la referencia externa de los 10 MHz también se obtengan resultados correctos y se puedan seguir enviando telecomandos y no tener que detener el funcionamiento de la estación. A pesar de la diferencia en cuanto a la referencia que se utiliza, para ambas pruebas el resultado obtenido es satisfactorio: se puede ver *Pass* en el centro de la pantalla [16].

Los datos mostrados encima de las gráficas que se observan en Fig.18 y Fig.19 aportan los valores que tiene el ruido de fase en las diferentes frecuencias de referencia, puesto que son aquellas para las que se quiere saber los resultados de la prueba. Destaca en la tercera columna el apartado *Spot Noise*, donde se muestra el ruido de fase que corresponde a las frecuencias de 1 KHz, 10 KHz, 100 KHz y 1 MHz, y los *Marker*, que se utilizan para conocer el ruido de fase de otras frecuencias (10 Hz, 100 Hz y 10 MHz) que no aparecen en apartado anterior de *Spot Noise*.

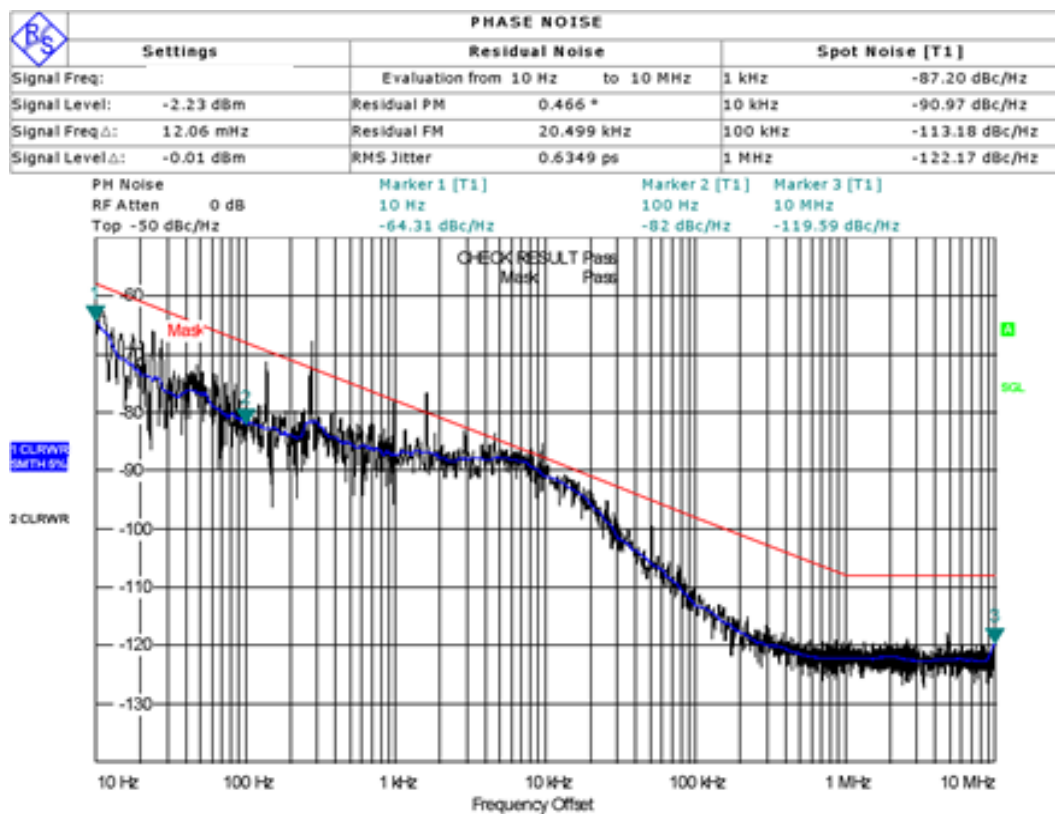


Fig. 18. BBM1, UC1, SSPA1. Canal 2 ref. externa. Fuente: Elaboración propia

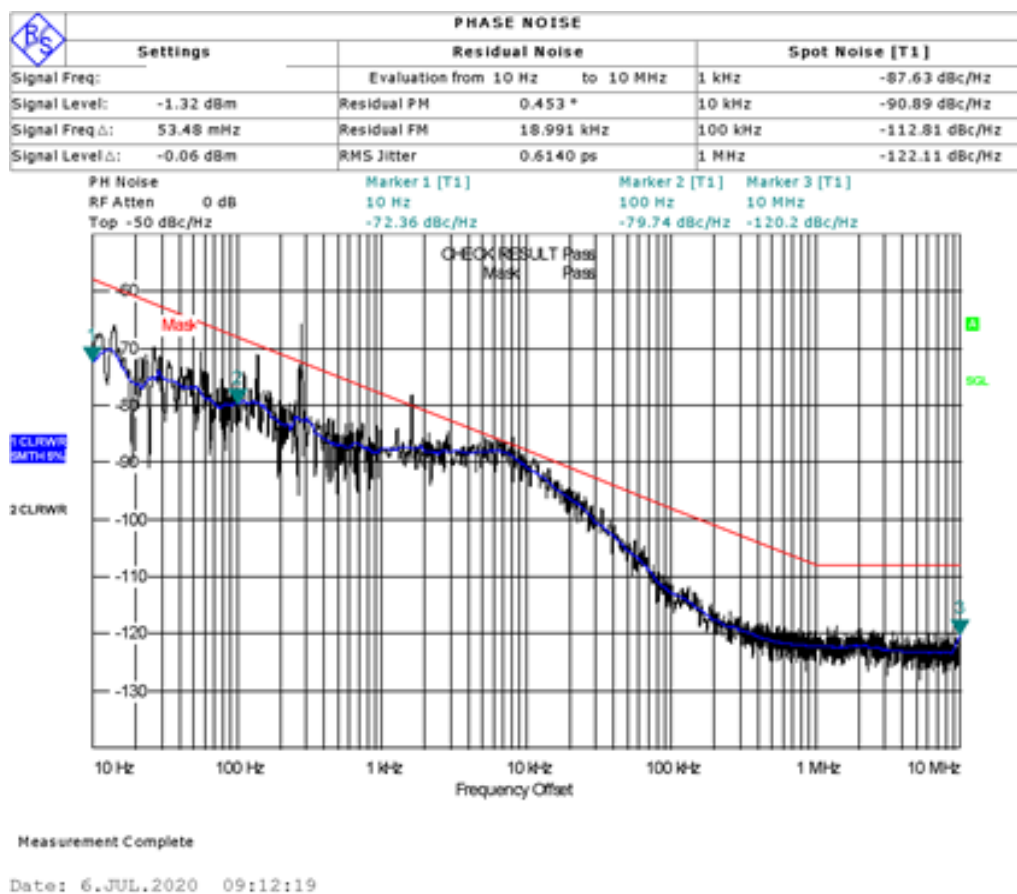


Fig. 19. BBM1, UC1, SSPA1. Canal 5 ref. interna. Fuente: Elaboración propia.

En la Fig.18 y la Fig.19, se aprecia como para la cadena de transmisión formada por el módem de banda base 1, el *up-converter* 1 y el SSPA 1 correspondiente al canal 2 y canal 5, respectivamente, de la frecuencia de banda S, el resultado obtenido de la prueba en ambos casos es satisfactorio como vemos en el *check result: Pass*. La diferencia entre ambas figuras es que en la Fig.18 se ha tomado como referencia la referencia externa a los distintos equipos, por lo que están sincronizados; mientras que en la Fig.19 se ha cogido como referencia la referencia interna de los equipos. El hecho de que el resultado sea satisfactorio para ambas referencias es positivo, pues en caso de ocurrir un fallo en la sincronización de los equipos y no poder disponer de la referencia externa, la estación podrá seguir funcionando, utilizando la referencia interna al ser fiable.

Por otro lado, en la Fig.18 y la Fig.19, se distinguen dos picos de valores de ruido de fase que sobrepasan los valores de la máscara en torno a los 300Hz y 2 KHz de offset con respecto a la frecuencia del canal 2 y 5, respectivamente, pero no lo suficiente prolongados en el tiempo como para suponer un problema para alterar la transmisión.

5.3. ANÁLISIS DE LA COMUNICACIÓN ENTRE UNA ESTACIÓN TERRENA DE CONTROL Y UN SIMULADOR DE SATÉLITE REAL DE LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA DE GALILEO

Se llevará a cabo un estudio en un sistema de Galileo, del que formarán parte todos los equipos de una estación terrena de control y un simulador de satélites Galileo de la ESA. Esta simulación es de gran valor, pues aporta datos próximos a los reales de cómo se produce una comunicación de una estación de control real de Galileo con un satélite Galileo, por lo que existen muchos datos que no se pueden mostrar debido a la alta confidencialidad, pero a continuación se exponen los máximos detalles posibles. Antes de explicar la simulación se expondrán algunos conceptos claves para que sea más fácil su comprensión.

El primer apunte para la realización de la prueba es que la comunicación se puede realizar en modo coherente o no coherente y la modulación puede ser utilizando espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) o utilizando modulación analógica del tipo modulación en fase (PM), como se ha explicado anteriormente en el apartado 4.2. Posteriormente, como se puede observar en la Fig.20, se debe indicar la polarización de la antena: LHCP o RHCP.

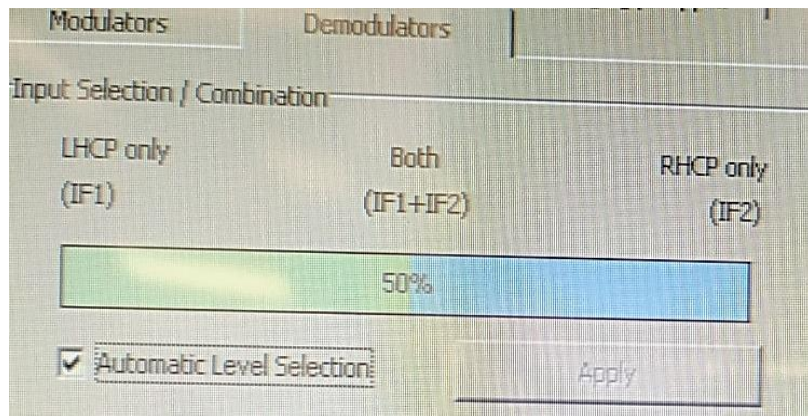


Fig. 20. Selección de polarización LHCP o RHCP. Fuente: Simulador de satélites Galileo de la ESA.

A la hora de realizar la prueba en la cadena de radiofrecuencia, es imprescindible realizar un estudio de las atenuaciones y las potencias que se van a utilizar. En caso de utilizar un valor erróneo, puede suceder que alguno de los equipos se estropee por lo que es fundamental asegurarse de que está todo conectado correctamente y con la correspondiente atenuación antes de llevar a cabo la prueba prevista. Los conectores de los extremos de los cables juegan un papel importante, ya que se utiliza un tipo u otro en función de la frecuencia a la que se trabaje con el equipo al que van conectados. Para la prueba realizada se requiere de tres tipos de conectores mostrados en la Fig.21 y Fig.22, son: N, BNC y SMA. Los conectores SMA y BNC se utilizan para equipos que trabajan en IF y para instrumentación de laboratorio como los osciloscopios. Los conectores N se utilizan para frecuencias altas de hasta 11 GHz y fue el primer tipo de conector que se usó en microondas con resultados satisfactorios.



Fig. 21. Conectores macho BNC(a), N(b) y SMA(c). Fuente: INDRA.



Fig. 22. Conectores hembra BNC(a), N(b) y SMA(c). Fuente: INDRA.

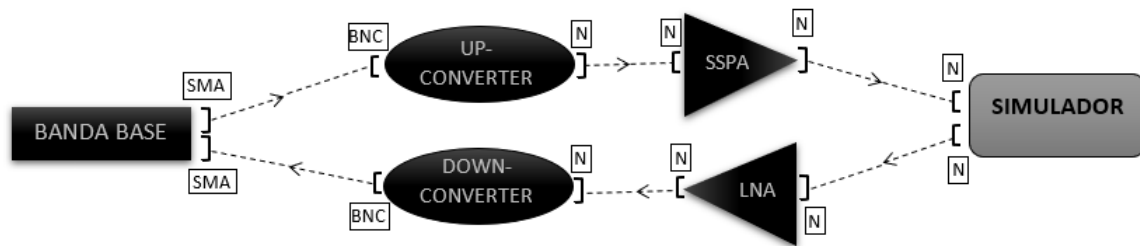


Fig. 23. Cadena de radiofrecuencia y conectores usados en la simulación. Fuente: Elaboración propia.

En la Fig.23 se representa mediante un diagrama de bloques las cadenas de radiofrecuencia utilizadas para transmisión y recepción entre la estación de control y el simulador de satélites Galileo, indicando en el mismo los diferentes conectores utilizados para los cables de radiofrecuencia que unen los distintos equipos involucrados.

Antes de situar cada equipo en la estación se debe configurar la IP que van a tener, pues todos ellos deben pertenecer a una red privada creada para la estación para poder tener acceso a la red.

Para la prueba que se va a realizar se deben de tener en cuenta los valores de frecuencias, potencias y atenuaciones para la cadena de radiofrecuencia.

Respecto a las frecuencias utilizadas, la banda base se utilizará para frecuencias intermedias estandarizadas. En los convertidores, se modifica la frecuencia recibida de la banda base a una ubicada en la banda S entre 2 y 3 GHz, que varía en función de si se trata del enlace ascendente o descendente, pero siempre dentro de esa banda. Los amplificadores trabajan también en estas frecuencias de la banda S, en la que opera el resto de la cadena desde los convertidores.

Para saber la potencia que puede soportar cada equipo, se debe comprobar el manual de usuario del equipo correspondiente y así ver el rango de valores adecuado para una comunicación eficiente sin ningún problema en este aspecto, además del peligro que supondría una configuración errónea pues daría lugar a la rotura del equipo de la estación. Tras consultar todos los manuales, se estableció que cada equipo tuviera unos valores concretos de potencias que se mantuviesen en todo momento dentro del rango que abarca cada equipo.

Enlace ascendente

Teniendo en cuenta todos los valores de ganancias de los equipos que se encuentran en el enlace ascendente y atenuaciones de los cables que los conectan, al simulador del satélite Galileo le llega la señal con una potencia que se encuentra dentro del rango de potencias que soporta el simulador, por lo que la comunicación no dará problemas en este aspecto.

Enlace descendente

Teniendo en cuenta los valores medidos de ganancias de equipos del enlace descendente y atenuaciones de los cables, a la entrada del módem de banda base se tiene una potencia que está entre los valores de potencias que soporta el equipo correspondiente. Si no se puede garantizar que el valor de la potencia recibida estuviera dentro del intervalo de potencias adecuado para el equipo se debe colocar un atenuador externo.

Una vez se tienen controlados todos los valores de potencias y atenuaciones que van a tener los elementos de la cadena de radiofrecuencia, se indica en el simulador el satélite concreto de la constelación de Galileo que se quiere probar, pues es capaz de simular cualquiera del conjunto de satélites Galileo que hay en la actualidad. Para poder transmitir desde el simulador la telemetría y recibir telecomandos de la estación de control se debe activar en la interfaz Rx Power y Tx Power como se muestra en la Fig.24.

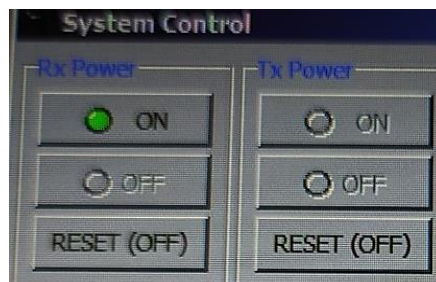


Fig. 24. Tx y Rx Power. Fuente: Simulador de satélites Galileo de la ESA

La configuración del tipo de comunicación se hace en la interfaz del simulador en el apartado Transponder Control. Como se muestra en la Fig.25, se selecciona el modo deseado: coherente o no coherente; la modulación: PM Mode o SS Mode; y se habilita la función de *ranging* medida explicada anteriormente, así como la transmisión de telemetría.

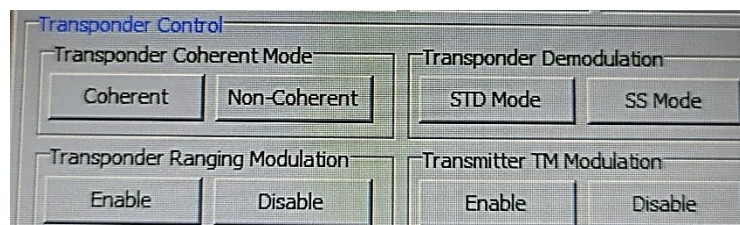


Fig. 25. Control del transpondedor del simulador de satélites. Fuente: Simulador de satélites Galileo de ESA

Toda la configuración de los equipos se puede hacer de forma local o remota. Localmente se hace a través de los menús de los distintos equipos mediante la configuración de cada uno de los parámetros que los caracterizan (ganancias, frecuencia a la que operan), mientras que de forma remota se hace a través de un

ordenador con una interfaz llamada MMI (*Man-Machine Interface*), donde se ve todo el esquema de la estación y se aprecia si cada equipo está funcionando correctamente (aparece en color verde en caso de ser así).

Los pasos para realizar la comunicación en remoto se llevan a cabo a través de las siguientes directivas de la interfaz MMI:

- “Update Sat ID”: Elige el satélite Galileo con el que se va a comunicar la estación de control y la cadena que se va a utilizar, puesto que en transmisión hay ocho cadenas posibles en función de los equipos que se utilicen: cuál de los dos módem de banda base, cuál de los dos *up-converter* y cuál de los dos amplificadores SSPA; y en la cadena de recepción, en función de cuál de los amplificadores LNA y *down-converter* se utilicen.
- “Start contact”: Establece contacto con los equipos de la estación de control y los configura automáticamente. Esto significa que en el módem de banda base sitúa la potencia de salida en un valor concreto dentro del rango que permite el equipo, en los *up-converter* pone la ganancia a 20 dB y en los *down-converter* configura su ganancia a 45 dB, que son valores estándar establecidos con los que el cliente realiza pruebas como las FAT.
- “Enable Carrier”: La función de este paso es habilitar la portadora, por lo que en la cadena de transmisión se emite a la frecuencia seleccionada desde el módem de banda base pasando por los convertidores, en los que se ha habilitado la portadora automáticamente al ejecutar esta instrucción en el MMI.
- “Switch to coherent”: Por defecto, la comunicación comienza en modo no coherente, por lo que los equipos de la estación de control y los del simulador del satélite tienen cada uno su propia referencia. Para que tengan la misma referencia y sea una comunicación de mayor calidad, se debe cambiar a modo coherente usando esta directriz desde el MMI.
- “Start Ranging”: Con esta instrucción, se lleva a cabo la función del *ranging* medida, se puede ir siguiendo a través de la interfaz de la banda base y se observa el resultado obtenido.

Tras realizar todos los anteriores pasos se observa que la realización de la prueba ha obtenido un resultado satisfactorio, pues se ha logrado llevar a cabo la comunicación entre los equipos de una estación de control Galileo con el simulador de satélites Galileo de la ESA sin ningún tipo de problema teniendo en cuenta todos los aspectos comentados anteriormente. En la Fig.26 se observa, además de los modos de

comunicación seleccionados explicados anteriormente, cómo la portadora se comunica de manera correcta, mostrándose en la interfaz del simulador del satélite como resultado “*Locked*”.

Carrier Lock	Locked	-
Q Code Lock	Locked	-
Bit Lock	Locked	-
Ranging	-	On
SS Mode	On	-
STD Mode	Off	-
TM Modulation	-	On

Fig. 26 Resultados de la comunicación. Fuente: Simulador de satélites Galileo de la ESA

Una vez acabada la prueba, se procede a desconectar el MMI de los equipos con los siguientes pasos:

- “Stop Ranging”: El MMI deja de hacer la función del *ranging* medida con esta instrucción.
- “Switch to non coherent”: La comunicación deja de ser en modo coherente para volver a ser en no coherente, por lo que la referencia pasa a ser la de los equipos de la estación de control la suya propia y lo mismo hace el simulador del satélite.
- “Disable Carrier”: La portadora se deshabilita, por lo que deja de tener lugar la comunicación y se detiene el envío de telecomandos entre la estación de control y el simulador del satélite.
- “Stop contact”: La interfaz del MMI pierde el contacto con los equipos de la estación de control y los distintos valores de los parámetros de las configuraciones de los equipos de la estación de control vuelven a los valores predeterminados que tenían antes de la prueba que se ha realizado.

5.4. RESOLUCIÓN DE FALLOS

Para finalizar el trabajo, se va a exponer que pasaría si estas pruebas realizadas no obtuvieran un resultado satisfactorio. Esto se podría deber a varios motivos, que se exponen a continuación para cada prueba.

En la prueba de ruido de fase, habría que comprobar lo primero que las potencias y atenuaciones utilizadas en cada punto de la cadena de transmisión son las adecuadas. Si son correctas, se pasa a testear que la referencia externa y la referencia interna funcionen adecuadamente, puesto que mediante un analizador de espectros se puede observar si la señal tomada se muestra correctamente. También hay que cerciorarse de

que todos los cables que conectan los equipos estén bien introducidos en estos. Con los manuales de usuario de los distintos equipos del proyecto Galileo, se comprueba que se hayan configurado bien todos ellos. Si el problema persiste, se puede deber a un defecto de fábrica o una desconfiguración de alguno de estos equipos, puesto que, aunque deban pasar estas mismas pruebas antes de venderse al cliente y lo acrediten mediante un informe, los equipos son muy sensibles y ante un mal uso previo pueden llegar a desconfigurarse. En este caso, INDRA Sistemas S.A. tiene acuerdos con proveedores, a los que se enviaría el equipo correspondiente para su arreglo en fábrica.

En la prueba de la comunicación de los equipos de la estación de control con el simulador de satélites Galileo de la ESA, lo primero que se debe comprobar es que las potencias y las atenuaciones de los distintos equipos empleados tanto para la cadena de transmisión como para la de recepción son las correctas establecidas anteriormente. Se debe confirmar que no haya ningún problema con los conectores de los cables en los equipos. Si el problema persiste en la cadena de transmisión o recepción, se comprueba la configuración utilizada en esa cadena para cada uno de los equipos y también los parámetros introducidos en el simulador de satélites de la ESA, aunque no se puede entrar en detalle en estos por tema de confidencialidad.

Cada detalle es importante y se debe tener en cuenta todos los aspectos mencionados en el trabajo, puesto que los equipos de la estación, el simulador de satélites Galileo de la ESA y la instrumentación de laboratorio utilizada son muy delicados y de un alto coste y podrían sufrir daños irreversibles ante un mal uso.

6. CONCLUSIONES

En este Trabajo de Fin de Grado se ha buscado dar a conocer al usuario lo que significan las comunicaciones por satélite de *command & control* en la actualidad, explicando el origen de estas, los tipos de sistemas que se encuentran en funcionamiento, las aplicaciones para las que se dan uso y los elementos que utilizan para llevar a cabo la comunicación, centrándose en el sistema actual europeo Galileo.

Dentro del sistema Galileo, se han expuesto los equipos más importantes de una estación de control y la función que desempeñan cada uno de ellos en la comunicación de la estación con el satélite. Tras el desarrollo explicativo, se ha procedido a detallar la realización de dos pruebas experimentales en un sistema real de Galileo de gran valor para el análisis de una comunicación por satélite, que he realizado en colaboración con la empresa Indra Sistemas S.A.

En la primera prueba, se ha medido una interferencia llamada ruido de fase en la cadena de transmisión de una estación de control, por lo que se puede apreciar la calidad con la que se envía la señal al satélite y los parámetros que hay que tener en cuenta para que la comunicación sea de una calidad adecuada. En la segunda prueba, se ha llevado a cabo una comunicación real con un simulador de satélites Galileo perteneciente a la ESA, y se han expuesto todos los pasos y detalles que hay que tener en cuenta para que la comunicación de los equipos de la estación de control con el simulador sea satisfactoria.

Considero que este trabajo realizado tiene relevancia, ya que hay pocas evidencias publicadas que aborden con detalle las comunicaciones con satélite del sistema Galileo de forma práctica. Creo que lo expuesto durante el trabajo permite conocer mejor cómo funcionan, sobre todo, gracias a la última prueba que he podido desarrollar en la empresa que, aunque se utiliza un simulador de satélite Galileo, asemeja muy bien lo que ocurre en la realidad, ya que los equipos que he utilizado para realizar la simulación son los que se encuentran en una estación de control real que se comunica con el satélite. Todo esto se ha desarrollado con la ayuda imprescindible de INDRA Sistemas S.A., ya que gracias a las publicaciones de la empresa he podido conocer en profundidad el sistema Galileo y desarrollar el trabajo, además de realizar las pruebas con equipos reales utilizados en una estación de control, algo inaccesible para el resto de las personas ajenas al proyecto. Hay datos que no se han podido mostrar por exigencias de confidencialidad de Indra Sistemas S.A. y de la ESA, pero aun así las pruebas descritas y los detalles dados ayudan a entender cómo funciona en la realidad un sistema real de comunicaciones del sistema Galileo.

De cara a una posible ampliación de este proyecto, se podría añadir, por ejemplo, una prueba de los espurios, que es otro tipo importante de interferencia que se puede dar en la señal. Para ello, se necesitaría acceso a los mismos equipos de una estación de control de Galileo utilizados para la prueba de ruido de fase.

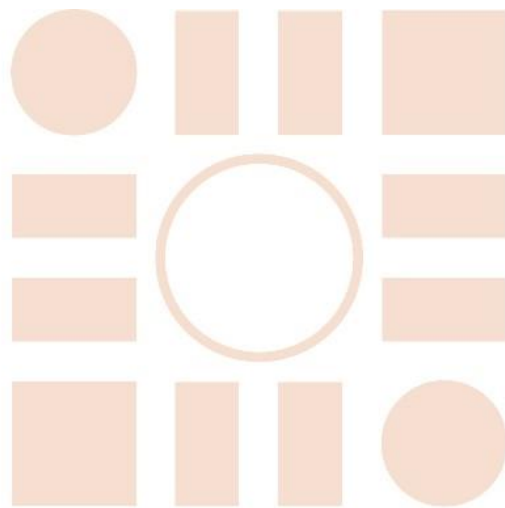
7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Luque Ordóñez, “Comunicaciones por satélite,” *Rev. Acta*, 2013.
- [2] “satélite | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE,” 2019.
- [3] “FUNDAMENTOS COMUNICACIONES VÍA SATÉLITE”. Fernando Herrera Ávila, 2018.
- [4] J. A. Díaz and T. Velasco, “Global Navigation Satellite Systems And Services”, IGI Global, 2011, pp. 89–130.
- [5] J. L. Berné Valero, N. Garrido Villén, and R. Capilla Romá, *GNSS: GPS, Galileo, Glonass, Beidou. Fundamentos y métodos de posicionamiento*, 1st ed. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València, 2019.
- [6] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, *GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*, 2nd ed. Strauss GmbH, Mörlenbach, Germany, 2008.
- [7] J. Arribas Lázaro, “GNSS array-based acquisition: theory and implementation,” *TDX (Tesis Dr. en Xarxa)*, Jun. 2012.
- [8] X. Li *et al.*, “Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo,” *J. Geod.*, vol. 89, Mar. 2015
- [9] J. Luis, B. Valero, A. Belén, A. Julián, and N. Garrido Villén, *GNSS GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*. Valencia : Universitat Politècnica de València, 2014.
- [10] European Global Navigation Satellite Systems Agency, “Galileo is the European global satellite-based navigation system | European Global Navigation Satellite Systems Agency.” 2020.
- [11] INDRA SISTEMAS S.A., “Galileo TTCF IMBU Operation and Maintenance Manual,” 2010. CONFIDENCIAL.
- [12] INDRA SISTEMAS S.A., “Combined, S-Band Up and Down Converter,” 2019. CONFIDENCIAL.
- [13] INDRA SISTEMAS S.A., “INSTALLATION AND OPERATION MANUAL 800W S-BAND RACK-MOUNT SOLID STATE POWER AMPLIFIER,” 2019. CONFIDENCIAL.
- [14] INDRA SISTEMAS S.A., “Operating Manual ACU - Local User Interface,” 2020. CONFIDENCIAL.

[15] INDRA SISTEMAS S.A., "DIGITAL TRACKING RECEIVER DTR USER'S MANUAL," 2010. CONFIDENCIAL.

[16] INDRA SISTEMAS S.A., "FAT - Test Procedures," 2019. CONFIDENCIAL.

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá